

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

**Polarizovaný elektromagnet – FEM simulace**  
Polarized Electromagnet – FEM Simulation

# Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Ondřej Najbr**

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

**Polarizovaný elektromagnet - FEM simulace**  
**Polarized Electromagnet - FEM Simulation**

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor (základní princip, konstrukce, provedení)
3. Navrhněte základní konstrukční uspořádání polarizovaného elektromagnetu pro ovládání spínacích kontaktů el. přístroje
4. Vytvořte FEM model polarizovaného elektromagnetu
5. Proveďte simulaci jeho činnosti a chování
6. Vyhodnoťte provedenou analýzu
7. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje, Praha, 1985, SNTL
- HAVELKA, Otto. Stavba elektrických přístrojů I., Brno, 1984, VUT Brno
- BULL, B.K.: Elektrické přístroje, SNTL Praha, 1978
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

*„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.  
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

V Ostravě dne 28.4.2017



---

Podpis

Touto cestou bych rád chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za umožnění zpracování tohoto tématu práce, za cenné odborné znalosti a rady pro její vypracování, a také svoji rodině za veškerou podporu, kterou mi poskytovali během celého studia na vysoké škole.

## ABSTRAKT

Tato práce pojednává o návrhu a simulaci polarizovaného elektromagnetu, jehož analýza probíhala za pomoci metody konečných prvků (FEM). Celkem bylo pro výpočetní analýzu navrženo a zpracováno 9 různých vlastních konstrukcí elektromagnetu, ze kterých byla pro podrobnější rozbor provozních funkcí vybrána pouze jedna. Návrhy konstrukcí a výsledná analýza byla provedena prostřednictvím software „SolidWorks 2014“ a „ANSYS Maxwell v16“.

## ABSTRACT

This thesis discusses about the design and simulation of a polarized electromagnet, whose analysis is processed by finite element method. All 9 own designs of electromagnets were designed for analysis solutions. Only one design was selected for a detailed analysis of operating function. Suggestions of design and final analysis was made in the ‘SolidWorks 2014’ and ‘ANSYS Maxwell v16’ software.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromagnet, stejnosměrný elektromagnet, střídavý elektromagnet, polarizovaný elektromagnet, permanentní magnet, magnetické materiály, elektrický přístroj, kontaktní systém, metoda konečných prvků, elektromechanická charakteristika, magnetická indukce, magnetická intenzita, magnetický tok, časově proměnný výpočet, SolidWorks, ANSYS Maxwell.

## KEY WORDS

Electromagnet, DC electromagnet, AC electromagnet, polarized electromagnet, permanent magnet, magnetic materials, electrical apparatus, switching system, finite element method, electromechanic characteristic, magnetic induction, magnetic intensity, magnetic flow, transient solution, SolidWorks, ANSYS Maxwell.

## OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM ILUSTRACÍ.....</b>	<b>12</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>13</b>
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>14</b>
<b>2. ELEKTROMAGNETY A PERMANENTNÍ MAGNETY .....</b>	<b>14</b>
2.1. NEPOLARIZOVANÉ ELEKTROMAGNETY .....	15
2.1.1. Stejnoseměrné (DC) elektromagnety .....	15
2.1.2. Střídavé (AC) elektromagnety .....	24
2.1.3. Porovnání charakterů DC a AC elektromagnetů .....	25
2.2. POLARIZOVANÉ ELEKTROMAGNETY .....	26
2.2.1. Polarizované elektromagnety se sériovým magnetickým obvodem .....	27
2.2.2. Polarizované elektromagnety s paralelním magnetickým obvodem .....	29
2.2.3. Polarizované elektromagnety s můstkovým magnetickým obvodem .....	30
2.3. PERMANENTNÍ MAGNETY .....	32
<b>3. MAGNETICKÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI.....</b>	<b>33</b>
3.1. MAGNETIZACE A MAGNETIKA .....	33
3.2. HYSTEREZNÍ SMYČKA A JEJÍ PARAMETRY .....	35
3.2.1. Parametry .....	35
3.2.2. Demagnetizační křivka.....	36
3.3. MAGNETICKY MĚKKÉ MATERIÁLY .....	37
3.3.1. Fe „Armco“ .....	38
3.3.2. Křemíková ocel .....	38
3.3.3. Slitina Ni-Fe „PERMALLOY“ .....	39
3.3.4. Amorfni kovy – magnetická kovová skla .....	39
3.4. MAGNETICKY TVRDÉ MATERIÁLY .....	39
3.4.1. Ferity.....	40
3.4.2. AlNiCo .....	40
3.4.3. SmCo.....	41
3.4.4. NdFeB.....	41
<b>4. NÁVRH POHONU URČENÉHO PRO OVLÁDÁNÍ SPÍNÁNÍ KONTAKTNÍHO SYSTÉMU .....</b>	<b>43</b>
4.1. KONSTRUKČNÍ OMEZENÍ POHONU .....	44
4.2. NÁVRHY VLASTNÍCH KONSTRUKČNÍCH USPOŘÁDÁNÍ ELEKTROMAGNETU .....	44
4.2.1. Konstrukce 1 .....	44
4.2.2. Konstrukce 2 .....	45
4.2.3. Konstrukce 3 .....	45
4.2.4. Konstrukce 4 .....	46
4.2.5. Konstrukce 5 .....	46
4.2.6. Konstrukce 6 .....	46
4.2.7. Konstrukce 7 .....	47
4.2.8. Konstrukce 8 .....	47
4.2.9. Konstrukce 9 .....	48
4.3. POŽADAVKY NA KOREKTNOST KONTAKTNÍHO STYKU.....	48

<b>5. SOFTWAREVÁ PŘÍPRAVA FEM SIMULACE A JEJÍ VÝPOČET .....</b>	<b>51</b>
5.1. TVORBA A IMPORT MODELU .....	52
5.2. VÝBĚR VÝPOČTOVÉHO TYPU PROBLÉMU .....	53
5.3. DEFINICE POČÁTEČNÍCH A OKRAJOVÝCH PODMÍNEK.....	53
5.3.1. <i>Oblast vinutí</i> .....	54
5.3.2. <i>Oblast magnetického obvodu</i> .....	56
5.3.3. <i>Oblast tělesa kotvy elektromagnetu a jeho pohybu</i> .....	57
5.3.4. <i>Oblasti permanentních magnetů</i> .....	58
5.4. NASTAVENÍ VÝPOČETNÍ ANALÝZY .....	59
<b>6. VYHODNOCENÍ A ANALÝZA VÝPOČTENÝCH VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>62</b>
6.1. VÝCHOZÍ POLOHA KOTVY .....	62
6.2. PRVNÍ KRAJNÍ POLOHA KOTVY .....	65
6.3. OKAMŽIK PŘEPOLARIZOVÁVÁNÍ ELEKTROMAGNETU .....	67
6.4. OKAMŽIK PŘED KONCEM POLARIZACE ELEKTROMAGNETU .....	69
6.5. DRUHÁ KRAJNÍ POLOHA KOTVY .....	71
<b>7. ZÁVĚR .....</b>	<b>73</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>75</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>77</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Popis</i>
$A$	(Wb·m <sup>-1</sup> )	vektorový magnetický potenciál
$B$	(T)	magnetická indukce
$B_m$	(T)	maximální okamžitá hodnota magnetické indukce
$B_p$	(T)	velikost magnetické indukce pracovního bodu P demagnetizační křivky
$B_r$	(T)	magnetická remanence
$B_{x1}$	(T)	hodnota magnetické indukce, při které dosahuje intenzita velikosti $H_r$
$B'_{x1}$	(T)	hodnota magnetické indukce pro novou tzv. malou hysterezní smyčku
$B_{x2}$	(T)	hodnota magnetické indukce, při které je intenzita $H$ rovna nule
$B'_{x2}$	(T)	hodnota magnetické indukce pro malou hysterezní smyčku při $H = 0$
$B_0$	(T)	velikost magnetické indukce ve vakuu
$B_\delta$	(T)	velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře
$(BH)_{\max}$	(kJ·m <sup>-3</sup> )	maximální energetický součin
$C$	(F)	kapacita
$C_n$	(F)	kapacity o počtu $n$
$C_{\text{opt}}$	(F)	optimální velikost kapacity $C$
$D$	(C·m <sup>-2</sup> )	elektrická indukce
$D_k$	(m)	průměr kontaktu
$D$	(-)	označení prvku diody ve schématu
$E$	(V·m <sup>-1</sup> )	intenzita elektrického pole
$F$	(N)	tažná síla elektromagnetu
$F_{\text{av}}$	(N)	střední hodnota síly
$F_C$	(N)	celková hodnota síly působící na kontakt s přičtenou silou $F_{kp}$
$F_{ck}$	(N)	celková hodnota síly působící na kontakt
$F_e$	(N)	přitažlivá síla elektromagnetu pro průběh statické charakteristiky
$F_{e0}$	(N)	přitažlivá síla v případě, že vinutím cívky neprochází proud
$F_{e1}$	(N)	přitažlivá síla elektromagnetu pro průběh dynamické charakteristiky
$F_k$	(N)	kontaktní síla
$F_{kp}$	(N)	kontaktní přitlačná síla
$F_m$	(A)	magnetomotorické napětí
$F_p$	(N)	elektromagnetická síla udávající užitečnou energii $W_u$
$F_{pr}$	(N)	síla tahu vratné pružiny
$F_{\text{teor}}$	(N)	teoretická přitažlivá síla AC elektromagnetu
$F_{uz}$	(N)	síla vyvolána průchodem zkratového proudu přes kontaktní úžinu
$F_1$	(N)	přitažlivá síla elektromagnetu o tvaru válcové tupé kotvy
$F_2$	(N)	přitažlivá síla elektromagnetu o tvaru kotvy komolého kužele
$H$	(A·m <sup>-1</sup> )	intenzita magnetického pole
$H_c$	(A·m <sup>-1</sup> )	koercitivita magnetické intenzity
$H_B$	(MPa)	Brinellova tvrdost materiálu
$H_{cB}$	(A·m <sup>-1</sup> )	skutečná koercitivita, při níž je celková indukce $B$ v magnetu rovna nule
$H_{cJ}$	(A·m <sup>-1</sup> )	vnitřní koercitivita, při níž je celková polarizace $J$ v magnetu rovna nule
$H_d$	(A·m <sup>-1</sup> )	magnetická intenzita vnitřního demagnetizačního pole
$H_p$	(A·m <sup>-1</sup> )	velikost magnetické intenzity pracovního bodu P demagnetizační křivky
$H_r$	(A·m <sup>-1</sup> )	velikost magnetické intenzity, při které dosahuje indukce hodnoty $B_{x1}$



$I$	(A)	elektrický proud
$I_n$	(A)	elektrický jmenovitý proud
$I_k$	(A)	elektrický zkratový proud
$I_r$	(A)	řídící (budící) elektrický proud
$I_0$	(A)	elektrický proud naprázdno
$I_1$	(A)	elektrický záťahový proud
$I_\infty$	(A)	ustálená hodnota elektrického proudu
$J$	(T)	magnetická polarizace
$J$	(A·m <sup>-2</sup> )	plošná hustota prostorového proudu
$J_e$	(A·m <sup>-2</sup> )	hustota vnuceného (externího) proudu
$J_{in}$	(A·m <sup>-2</sup> )	hustota indukovaného proud
$J_0$	(A·m <sup>-2</sup> )	hustota vedeného (kondukčního) proudu
$J$	(-)	označení „jižního“ magnetického pólu zdroje magnetického pole
$K_{Cu}$	(Ω)	materiálová konstanta (součinitel) mědi, zahrnující vlastnosti materiálu, vlastnosti vrstev a poměry v místě kontaktního styku
$K_d$	(-)	demagnetizační faktor
$L$	(H)	indukčnost budící cívky elektromagnetu
$L_{zk}$	(H)	indukčnost závitu nakrátko
$M$	(A·m <sup>-1</sup> )	magnetizace
$M_e$	(A·m <sup>2</sup> )	elektromagnetický moment
$N$	(-)	počet závitů
$N_a$	(-)	počet závitů připadající na rozměr výšky dané cívky
$N_b$	(-)	počet závitů připadající na šířku dané cívky, počet vrstev navinutých závitů
$\Delta P_j$	(W)	Jouleovy ztráty
$\Delta P_k$	(W)	Jouleovy ztráty v místě kontaktního styku
$\Delta P_p$	(W)	Jouleovy ztráty vznikající v tělese kontaktu
$P$	(-)	pracovní bod demagnetizační křivky
$R$	(Ω)	ohmický odpor
$R_b$	(Ω)	paralelní (bočníkový) ohmický odpor
$R_{cvk}$	(Ω)	ohmický odpor vinutí cívky
$R_{Fe}$	(H <sup>-1</sup> )	magnetický odpor feromagnetika
$R_k$	(Ω)	ohmický kontaktní (stykový) odpor
$R_p$	(Ω)	ohmický odpor tělesa kontaktu
$R_{Ta}$	(K·W <sup>-1</sup> )	tepelný odpor
$R_u$	(Ω)	ohmický odpor kontaktní úžiny
$R_{zk}$	(Ω)	ohmický odpor závitu nakrátko
$R_0$	(Ω)	předřadný sériový ohmický odpor
$R_\delta$	(H <sup>-1</sup> )	magnetický odpor vzduchových mezer
$R'_\delta$	(H <sup>-1</sup> )	magnetický odpor parazitních vzduchových mezer
$R_{\delta c}$	(H <sup>-1</sup> )	celkový magnetický odpor vzduchových cest a feromagnetika
$S$	(m <sup>2</sup> )	plocha
$S_{Fe}$	(m <sup>2</sup> )	plocha průřezu magnetického obvodu
$S_v$	(m <sup>2</sup> )	plocha průřezu vodiče
$S$	(-)	označení „severního“ magnetického pólu zdroje magnetického pole
$T_c$	(K)	Curieova teplota (kritická)

$T_w$	(K)	maximální pracovní teplota
$T'_\Phi$	(s)	časová konstanta, podle níž se zvyšuje průběh magnetického toku $\Phi$
$U$	(V)	elektrické napětí
$U_m$	(V)	napětí měknutí mědi
$U_{sv}$	(V)	napětí svaření mědi
$U_2$	(V)	elektrické vstupní napětí přivedené na vinutí
$V$	(m <sup>3</sup> )	objem
$W$	(J)	energie
$W_e$	(J)	energie při nekonečně pomalém pohybu kotvy
$W_{kin}$	(J)	kinetická energie pohybujících se částí elektromagnetu
$W_u$	(J)	užitečná energie vykonaná elektromagnetickou silou
$W_m; W_{0-4}$	(J)	energie magnetizace elektromagnetu během přitahování kotvy
$W_{mech}$	(J)	mechanická energie odpovídající vynaložené práci k překonání sil působících proti přemístění kotvy z polohy kotvy $s_p$ do polohy kotvy $s_k$
$W_{mech\ av}$	(J)	mechanická energie odpovídající statické charakteristice $F_e$
$W_{mech\ dyn}$	(J)	mechanická energie odpovídající dynamické charakteristice $F_{e1}$
$W_{0-1}$	(J)	energie magnetického pole budící cívky elektromagnetu prvního období
$W_{1-3}$	(J)	energie magnetického pole budící cívky elektromagnetu druhého období
$W_{3-4}$	(J)	energie magnetického pole budící cívky elektromagnetu třetího období
$W_{0-1'-3}$	(J)	energie magnetického pole budící cívky elektromagnetu v poloze kotvy $s_k$
$W_{0-3-1'}$	(J)	energie magnetizace elektromagnetu odpovídající $W_{mech}$
$X, Y, Z$	(-)	souřadnice kartézské soustavy
$a, b$	(m)	strany průřezu (13)
$a, b, c$	(-)	konstanty určené konstrukcí a rozměry obvodu elektromagnetu (27)
$a, b, c, d$	(-)	označení průběhů tahové charakteristiky AC elektromagnetu
$c$	(m·s <sup>-1</sup> )	rychlost světla
$d_{Fe}$	(m)	náhradní hodnota průměru, ekvivalentní průřezu $S_{Fe}$
$d_u$	(m)	průměr kontaktní úžiny
$d_v$	(m)	průměr vodiče
$e$	(-)	Eulerovo číslo
$i$	(A)	okamžitá hodnota elektrického proudu
$i'_{rozb}$	(A)	okamžitá hodnota proudu po dobu rozběhu elektromagnetu při spínání
$i''_{rozb}$	(A)	okamžitá hodnota proudu po odepnutí elektromagnetu od zdroje
$k_s$	(m)	činitel sycení
$l$	(m)	délka
$m$	(kg)	hmotnost
$m_c$	(A·m <sup>2</sup> )	celkový magnetický moment daný vektorovým součtem momentů atomů magnetika v objemu dané látky
$n$	(-)	typ kontaktního styku (pro bodový $n = 0,5$ )
$r$	(m)	poloměr
$r_p$	(N·m <sup>-1</sup> )	tuhost pružiny
$s$	(m)	poloha kotvy elektromagnetu
$s_k$	(m)	konečná poloha kotvy elektromagnetu
$s_p$	(m)	počáteční poloha kotvy elektromagnetu
$t$	(s)	čas
$t'_p$	(s)	doba působení při spínání elektromagnetu

$t''_p$	(s)	doba působení při vypínání elektromagnetu
$t'_{poh}$	(s)	doba pohybu elektromagnetu při spínání
$t''_{poh}$	(s)	doba pohybu elektromagnetu při vypínání
$t'_{rozb}$	(s)	doba rozběhu elektromagnetu při spínání
$t''_{rozb}$	(s)	doba odpadu elektromagnetu při vypínání
$t_{sep}$	(s)	doba při sepnutém elektromagnetu
$t_{vyp}$	(s)	vypínací doba elektromagnetu
$\mathbf{v}$	(m·s <sup>-1</sup> )	vektor rychlosti
$v_k$	(m·s <sup>-1</sup> )	rychlost pohybu kotvy na konci zdvihu elektromagnetu
$x$	(m)	parametr rozdílu vzduchových mezer mezi kotvou a pólovými nástavci
$x, y, z$	(-)	souřadnice kartézské soustavy
$z_{10}$	(W·kg <sup>-1</sup> )	ztrátové číslo při působení magnetické indukce o velikosti $B = 1$ T
$\Theta_{dov}$	(K)	dovolené oteplení kontaktu
$\Theta_k$	(K)	oteplení kontaktu
$\Theta_m$	(K)	teplota měknutí mědi
$\Theta_o$	(K)	teplota okolí
$\Phi$	(Wb)	magnetický tok
$\Phi_{pol}$	(Wb)	polarizační magnetický tok
$\Phi_r$	(Wb)	řídící (budící) magnetický tok
$\Phi_{tep}$	(W)	tepelný tok
$\Phi_1$	(Wb)	magnetický tok vytvořený budícím vinutím; součet toků $\Phi'_1$ a $\Phi''_1$
$\Phi'_1$	(Wb)	magnetický tok procházející pólem mimo zkratované vinutí
$\Phi''_1$	(Wb)	magnetický tok procházející pólem zkratovaného vinutí
$\alpha_o$	(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	součinitel přestupu tepla do okolí
$\delta$	(m)	velikost vzduchové mezery
$\delta_p$	(m)	velikost vzduchové mezery v případě, že kotva odpadla do krajní polohy
$\varepsilon$	(F·m <sup>-1</sup> )	permitivita prostředí
$\varepsilon_r$	(-)	relativní permitivita
$\varepsilon_0$	(F·m <sup>-1</sup> )	permitivita vakua
$\varepsilon_\delta$	(-)	činitel vyklenutí
$\mu$	(H·m <sup>-1</sup> )	permeabilita prostředí
$\mu_r$	(-)	relativní permeabilita
$\mu_0$	(H·m <sup>-1</sup> )	permeabilita vakua
$\pi$	(-)	Ludolfovo číslo
$\rho$	(Ω·m)	měrný elektrický odpor
$\rho$	(C·m <sup>-2</sup> )	objemová hustota elektrického náboje
$\rho_{Cu}$	(Ω·m)	měrný elektrický odpor polotvrdé mědi
$\sigma$	(S·m <sup>-1</sup> )	měrná elektrická vodivost
$\tau$	(s)	časová konstanta
$\nu$	(m·H <sup>-1</sup> )	reluktivita
$\varphi$	(V)	skalární elektrický potenciál
$\chi_{mech}$	(-)	činitel využití konstrukce elektromagnetu
$\psi$	(Wb)	spřažený magnetický tok
$\psi_\infty$	(Wb)	ustálená hodnota spřaženého magnetického toku
$\omega$	(rad·s <sup>-1</sup> )	úhlová frekvence
$\nabla$	(-)	nabla vektor, diferenciální operátor

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
2D	dvojdímenzionální, dvojrozměrný
3D	trojdímenzionální, trojrozměrný
AC	střídavý proud (alternating current)
Ag	značka stříbra
Al	značka hliníku
AlNiCo	permanentní magnet o složení: hliník + nikl + kobalt
Au	značka zlata
B	značka boru
BaFeO <sub>4</sub>	železan barnatý
BH	$B = f(H)$ , magnetická indukce je funkcí magnetické intenzity
C	značka uhlíku
CAD	počítačem podporované projektování (computer-aided design)
Co	značka kobaltu
CoO	oxid kobaltnatý
Cu	značka mědi
DC	stejnoseměrný proud (direct current)
Dy	značka dysprosia
Fe	značka železa
FEM	finite element method (MKP)
FeO	oxid železnatý
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid železitý
FeS	sulfid železnatý
FET	unipolární tranzistory, řízené elektrickým polem (Field-Effect Transistors)
H <sub>2</sub> O	chemické složení vody
Hexaferity	hexagonální ferity
konst	konstanta
MKP	metoda konečných prvků (FEM)
MnO	oxid manganatý
MTP	měřicí transformátor proudu
NdFeB	permanentní magnet o složení: neodym + železo + bor
Ni	značka niklu
O <sub>2</sub>	kyslík
OS	operační systém
P	značka fosforu
Pt	značka platiny
S	značka síry
Si	značka křemíku
SmCo	permanentní magnet o složení: samarium + kobalt
Sr(FeO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	železitan strontnatý
TM	přechodový kov (transition metal)
wnd	vinutí (winding)
Zr	značka zirkonia

## SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1. Prostorové uspořádání základních částí elektromagnetu .....	15
Obr. 2. Schéma magnetického pole elektromagnetu [30] .....	15
Obr. 3. Tahová charakteristika stejnosměrného elektromagnetu [1], [5] .....	16
Obr. 4. Pracovní cyklus DC elektromagnetu [1].....	17
Obr. 5. Průběh dynamické charakteristiky [1].....	18
Obr. 6. Elektromechanická charakteristika elektromagnetu [1].....	19
Obr. 7. Průběh působení proudu ve vinutí elektromagnetu v čase [6].....	20
Obr. 8. Schéma zapojení obvodu a uspořádání elektromagnetu se závitem nakrátko [1], [6].....	21
Obr. 9. Schéma zapojení obvodu elektromagnetu s předřadným sériovým odporem [1], [6] .....	21
Obr. 10. Schéma zapojení obvodu elektromagnetu s paralelně zapojeným odporem [1], [6].....	21
Obr. 11. Schéma zapojení obvodu elektromagnetu s paralelně zapojenou diodou [1], [6] .....	21
Obr. 12. Schéma zapojení obvodu elektromagnetu s paralelně zapojeným kondenzátorem [1], [6] ....	21
Obr. 13. Schéma zapojení obvodu s předřadným odporem a rozpínacím kontaktem [1].....	23
Obr. 14. Schéma zapojení obvodu elektromagnetu s předřadným odporem a kondenzátorem [1].....	23
Obr. 15. Schéma zapojení obvodu s předřadným sériovým odporem a kondenzátory [6].....	23
Obr. 16. Časové průběhy přitažlivé síly a magnetické indukce [1].....	24
Obr. 17. Různé průběhy tahové charakteristiky AC elektromagnetu [1], [5].....	24
Obr. 18. Kotva elektromagnetu s různým nastavením [1] .....	26
Obr. 19. Polarizovaný elektromagnet se sériovým magnetickým obvodem [2].....	27
Obr. 20. Náhradní schéma polarizovaného elektromagnetu se sériovým magnetickým obvodem [1]..	27
Obr. 21. Elektromechanické charakteristiky polarizovaného elektromagnetu se sériovým magnetickým obvodem [1].....	28
Obr. 22. Polarizovaný elektromagnet s paralelním magnetickým obvodem [2] .....	29
Obr. 23. Náhradní schéma polarizovaného elektromagnetu s paralelním magnetickým obvodem [1]	29
Obr. 24. Polarizovaný elektromagnet s můstkovým magnetickým obvodem [2] .....	30
Obr. 25. Náhradní schéma polarizovaného elektromagnetu s můstkovým magnetickým obvodem [1]	30
Obr. 26. Elektromechanické charakteristiky polarizovaných elektromagnetů s paralelním nebo můstkovým magnetickým obvodem [1].....	31
Obr. 27. Zjednodušené průběhy elektromechanických charakteristik [1].....	31
Obr. 28. Vyobrazení směru působení magnetických momentů u jednotlivých magnetik [8].....	34
Obr. 29. Závislost $B = f(H)$ a $J = f(H)$ feromagnetického materiálu [7] .....	35
Obr. 30. Pracovní část hysterezní smyčky magneticky tvrdého materiálu [1], [17].....	36
Obr. 31. Charakteristická hysterezní smyčka pro magneticky měkké materiály [7].....	37
Obr. 32. Vyobrazení možných orientací krystalů v křemíkové oceli [12] .....	38
Obr. 33. Charakteristická hysterezní smyčka pro magneticky tvrdé materiály [7].....	39
Obr. 34. Různé výrobní formy tvrdých feritů [18].....	40
Obr. 35. Různé výrobní formy AlNiCo [27] .....	40
Obr. 36. Různé výrobní formy SmCo [28].....	41
Obr. 37. Struktury SmCo magnetů zvětšené 1000x [16].....	41
Obr. 38. Diskový NdFeB [29].....	41
Obr. 39. Struktura NdFeB magnetu zvětšená 1000x [16] .....	42
Obr. 40. Porovnání permanentních magnetů z hlediska $H_{cB}$ a $(BH)_{max}$ [7] .....	42

<i>Obr. 41. Fotografie kontaktního systému.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 42. Vyobrazení modelu konstrukce 1 .....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 43. Vyobrazení modelu konstrukce 2 .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 44. Vyobrazení modelu konstrukce 3 .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 45. Vyobrazení modelu konstrukce 4 .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 46. Vyobrazení modelu konstrukce 5 .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 47. Vyobrazení modelu konstrukce 6 .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 48. Vyobrazení modelu konstrukce 7 .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 49. Vyobrazení modelu konstrukce 8 .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 50. Vyobrazení modelu konstrukce 9 .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 51. Řez importovaným modelem s výrazněnými příslušnými oblastmi .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 52. Vyobrazení oblasti dráhy pohybu kotvy „band“ .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 53. Interpolační schéma základního trojúhelníkového elementu [21], [22].....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 54. Rozložení výpočtové sítě podle příslušného nastavení pro výchozí pozici kotvy 0 mm .....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 55. Graf závislosti provozních funkcí polarizovaného elektromagnetu na čase.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 56. Rozložení pole magnetické indukce B pro výchozí pozici kotvy 0 mm.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 57. Rozložení pole magnetické intenzity H společně s magnetickým tokem pro výchozí pozici kotvy 0 mm.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 58. Rozložení pole magnetické indukce B pro krajní pozici kotvy 17,5 mm .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 59. Rozložení pole magnetické intenzity H s magnetickým tokem pro pozici kotvy 17,5 mm .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 60. Rozložení pole magnetické indukce B pro pozici kotvy 10,82 mm.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 61. Rozložení pole magnetické intenzity H s magnetickým tokem pro pozici kotvy 10,82 mm .....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 62. Rozložení pole magnetické indukce B pro pozici kotvy 0 mm.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 63. Rozložení pole magnetické intenzity H s magnetickým tokem pro pozici kotvy 0 mm .....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 64. Rozložení pole magnetické indukce B pro krajní pozici kotvy -17,5 mm .....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 65. Rozložení pole magnetické intenzity H s magnetickým tokem pro pozici kotvy -17,5 mm .....</i>	<i>72</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Klasifikace vlastností permanentních magnetů [17] .....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 2. Naměřené rozměry krytu a kotvy.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 3. Velikost dráhy kotvy .....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 4. Naměřené hodnoty BH křivky ocele 11 600 [14] .....</i>	<i>57</i>

## 1. ÚVOD

Tato práce je zaměřena na výpočtovou simulaci elektromagnetu, jehož konkrétní typ a konstrukce byly navrženy na základě požadavků určených pro pohon příslušného předloženého kontaktního systému. Daný kontaktní systém je součástí pomocných elektrických přístrojů drážních vagónů, který je určen pro spínání a rozpínání určitých obvodových sekcí sloužících pro potřeby obsluhy (případně pasažérů) ve vozidle. Ovládání kontaktního systému je prováděno z palubní přístrojové desky v kabině strojvedoucího. Kontaktní systém není konstrukčně uzpůsoben k zhášení elektrického oblouku mezi kontakty – jedná se tedy o typ přístrojového odpojovače.

Práce je strukturovaná do několika tematických celků, které jsou tvořeny 5 hlavními kapitolami. První kapitola je věnována základním definicím elektrických přístrojů, konkrétněji různým typům elektromagnetů s jejich možnými provozními stavy či podmínkami. Druhá kapitola se zabývá rozбором magnetických materiálů a jejich různorodostí, tj. vlastnostmi, složením a technologií výroby. Třetí kapitola zahrnuje popis kontaktního systému společně s příslušnými výpočty, týkající se především dynamických účinků proudu, které působí na kontakty přístroje a dále popisem všech navržených konstrukcí polarizovaného elektromagnetu pro pohon kontaktního systému. Ve čtvrté kapitole probíhá popis a definice počátečních a okrajových podmínek potřebných pro nastavení výpočetní simulace v softwaru „ANSYS Maxwell“. V poslední páté kapitole je poté proveden rozbor výsledné výpočetní analýzy.

## 2. ELEKTROMAGNETY A PERMANENTNÍ MAGNETY

Elektromagnetem se nazývá zařízení, které při své činnosti vytváří za pomoci budícího vinutí v určitém prostoru magnetický tok [1]. Principiálně vinutím, které je navinuté na příslušný magnetický obvod, protéká elektrický proud, který má za následek vytvoření magnetického pole. Toto vinutí prakticky tvoří cívku, v jejímž jádře se nachází magnetický obvod daného elektromagnetu. Magnetický obvod vykazuje vyšší magnetickou vodivost než okolní prostředí a proto se přes něj převážně uzavírá hlavní magnetický tok.

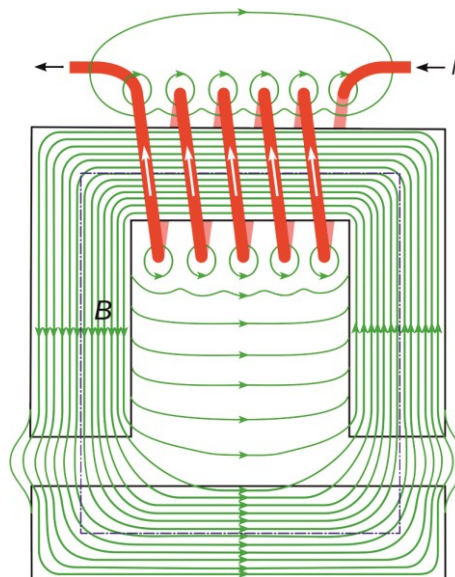
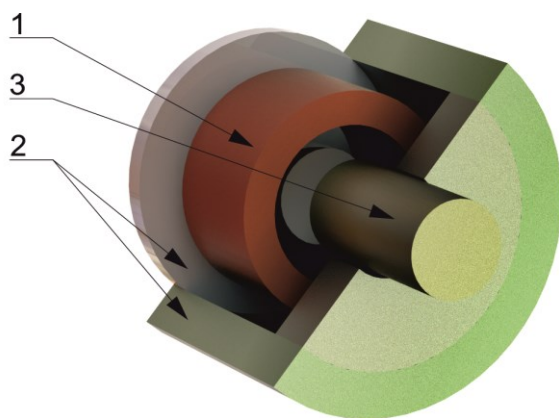
Využívá se tedy silových účinků, vyvolané elektrickým proudem za působení magnetického pole, ke konání mechanické práce (přeměna elektrické energie na mechanickou) [6]. Prvotně se můžou elektromagnety rozdělit na *přidržené* a *pohybové*. *Přidržené* elektromagnety se užívají pro dočasné přidržení předmětů z ferromagnetických materiálů (přenášení, obrábění, brzdění) a *pohybové* pro posun dané části magnetického obvodu (kotvy), např. otevírání ventilů, uvolnění brzdy či při spínání pomocného elektrického obvodu.

Elektromagnet však ve své podstatě není elektrickým přístrojem. Přístroj je pomocné zařízení určené pro spínání, k ochraně a řízení silnoproudých elektrických obvodů. Elektromagnet může však pracovat samostatně (bez elektrického stroje) a svojí funkcí odpovídá spíše elektrickému stroji. Vzhledem k tomu, že je však součástí mechanismů většiny elektrických přístrojů, je tak tedy běžně zařazován do skupiny elektrických přístrojů.

Dle typu procházejícího budícího proudu se mohou elektromagnety rozdělit na stejnosměrné a střídavé. [4]

## 2.1. Nepolarizované elektromagnety

Základní části elektromagnetu se skládají z budicí cívky (1) uložené v nepohyblivém feromagnetickém obvodu (2), který je určen pro posuv kotvy (3) na základě působení elektromagnetických sil. Při svém pohybu se mění poloha vnějšího mechanismu, s nímž je spojena. Kotva je oddělena od nepohyblivé části elektromagnetu vzduchovou mezerou. Pohybem kotvy, vyvolaným přitažlivou silou, se vykonává práce na vnějším zařízení, s nímž je kotva pevně spojena.



Obr. 1. Prostorové uspořádání základních částí elektromagnetu      Obr. 2. Schéma magnetického pole elektromagnetu [30]

Podle způsobu uložení kotvy, vzhledem k nepohyblivé části a podle charakteru magnetického pole tvořící silové účinky, se dělí elektromagnety na elektromagnety s vtahující se kotvou, s vně uloženou přitahující se kotvou a s vnější kotvou pohybující se v příčném směru (tzv. elektromagnety s otočnou kotvou).

Počet i tvar vzduchových mezer závisí na konstrukčním uspořádání elektromagnetu. Mezery, v nichž vzniká užitečná přitažlivá síla, se označují jako pracovní. V magnetickém obvodu se též nachází i parazitní vzduchové mezery, které nepřispívají ke vzniku užitečné síly (např. kluzná vzduchová mezera, u elektromagnetu s vtahující se kotvou, nacházející se mezi kotvou a spodní částí pláště elektromagnetu). [1]

### 2.1.1. Stejnoseměrné (DC) elektromagnety

Ve stejnosměrných (nepolarizovaných) elektromagnetech se magnetický tok vytváří za pomoci budicí cívky, kterou prochází stejnosměrný proud. Nepolarizované elektromagnety se v technické praxi nejvíce rozšířily z důvodů hospodárnějšího využití a z hlediska možnosti nejrůznějších zhotovení konstrukčních variant, které se mohou snadno přizpůsobit různým provozním požadavkům.

Velmi často tvoří součást elektromagnetických mechanismů zajišťujících pohyb určité části přístroje, jako např. brzdové elektromagnety, elektromagnetické spojky, elektromagnety pohyblivých částí stykačů, spouštěčů, vypínačů, jističů, relé, regulátorů aj. [1]



Podle způsobu připojení budicí cívky na napájecí zdroj se elektromagnety dělí na *sériové* a *paralelní*.

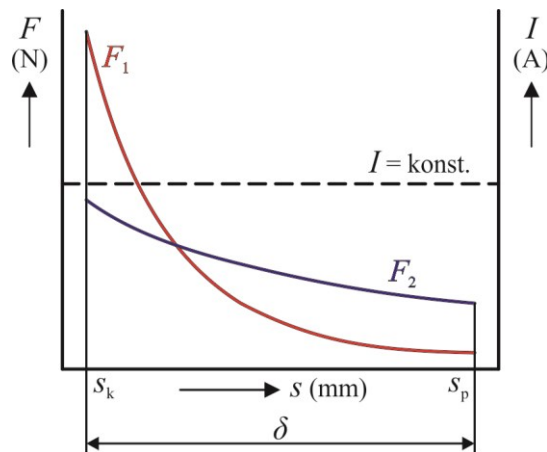
Vinutí *sériových* elektromagnetů se připojuje do série s elektrickým obvodem, takže budicí proud elektromagnetu je určen hlavně odporem vnějšího obvodu. Sériové zapojení se používá jen u brzdových elektromagnetů pro sériové DC elektromotory. [1], [5]

U *paralelně* zapojeného elektromagnetu se budicí vinutí připojuje přímo nebo přes přídavný odpor  $R_0$  na zdroj napětí. Proud ve vinutí elektromagnetu je převážně určen odporem tohoto vinutí.

### Statická tahová charakteristika

Závislost tahové síly  $F$  kotvy stejnosměrného elektromagnetu je závislá na zdvihu. Elektromagnet odebírá ze zdroje stálý proud, který představuje stálé buzení. Zmenšováním zdvihu (vzduchové mezery  $\delta$ ) se zmenšuje magnetický odpor obvodu. Stálé magnetomotorické napětí  $F_m$  tzv. protlačuje magnetický tok  $\Phi$  přes elektromagnet, kterému pak odpovídá větší síla. Charakteristiku je možno zjišťovat buď měřením při stojící kotvě (kdy se po malých úsecích mění velikost vzduchové mezery) nebo za pomoci softwarové simulace. [5], [6]

Závislost zatěžovací síly na poloze kotvy na Obr. 3 (při  $i = \text{konst}$ ) závisí na konstrukci i materiálu magnetického obvodu a na vzájemném poměru jeho rozměrů. Může se například vhodně ovlivnit změnou tvaru pólových nástavců a kotvy (a tím i vzduchové mezery), která je standardně tvaru válcového tupého ( $F_1$ ), např. do tvaru komolého kužele ( $F_2$ ), která umožňuje rovnoměrnější tah a menší sílu na konci zdvihu. Zda-li je kotva opatřena výstupkem vhodného tvaru oproti rovné dosedací ploše, bude sklon charakteristiky menší. [1], [5]



Obr. 3. Tahová charakteristika stejnosměrného elektromagnetu [1], [5]

Absolutní hodnota tažné síly pro stejnosměrný elektromagnet je dána vztahem: [6]

$$|F| = \frac{\mu_0 \cdot S}{2 \cdot \delta^2} \cdot F_m^2 \quad (\text{N}; \text{H} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}^2, \text{A}, \text{m}) \quad (1)$$

Ze vztahu (1) je zjevné, že tažná síla stejnosměrného elektromagnetu je nepřímo úměrná kvadrátu vzdálenosti vzduchové mezery: [15]

$$F \approx \delta^{-2} \quad (2)$$

U stejnosměrného elektromagnetu je proud v cívce při každém zdvihu stálý. Je dán napětím a odporem cívky. Při tahu se mění vzduchová mezera, indukce v ní se zvětšuje a přitažlivá síla vzrůstá s druhou mocninou indukce, viz vztah (21). [5]

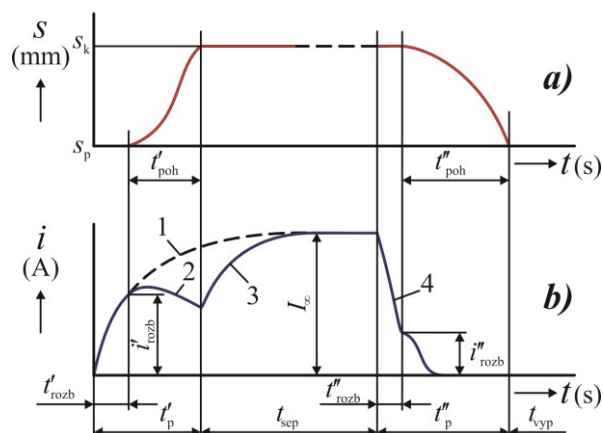
Způsobem napájení se ovlivňuje průběh některých charakteristik, a to hlavně u dynamických charakteristik. [1]

### Dynamické charakteristiky

Provoz elektromagnetu v elektromagnetickém mechanismu má cyklický charakter. Kotva zaujímá postupně různé polohy, koná mechanickou práci a pak se vrací do výchozího postavení.

První část pracovního cyklu na Obr. 4 představuje přitažení elektromagnetu, která začíná v okamžiku připojení budicího vinutí na zdroj, kdy kotva opouští svoji výchozí počáteční polohu  $s_p$  a končí ve chvíli, kdy dosáhne konečné polohy  $s_k$ . Doba působení  $t_p$  se dělí na dobu rozběhu  $t_{roz}$  a dobu pohybu  $t_{poh}$  (při spínání se označuje jako  $t'_p$ ,  $t'_{roz}$ ,  $t'_{poh}$ ).

V době rozběhu se proud ve vinutí elektromagnetu zvětšuje na velikost  $i'_{roz}$ , při jejímž dosažení dochází k rovnosti elektromagnetických a mechanických sil směřujících proti sobě.



Obr. 4. Pracovní cyklus DC elektromagnetu [1]

a) závislost polohy kotvy na čase

b) časový průběh proudu budicí cívky

Doba  $t'_{roz}$  závisí jak na způsobu zapojení budicích cívek elektromagnetu, tak i na konstrukčním řešení elektromagnetu a na jeho zátěži. I u stejného elektromagnetu se mění doba rozběhu podle velikosti síly zátěže, která působí na kotvu.

Během doby pohybu koná elektromagnet užitečnou práci, pro niž je určen. Proud v budicí cívce se v tomto období zpravidla mění (křivka 2 na Obr. 4). Její časová změna je způsobena nejen základním přechodným jevem, probíhajícím po připojení cívky na stejnosměrné napětí (křivka 1 na Obr. 4), ale také indukovaným napětím vznikajícím pohybem kotvy.

Po přitažení nastává sepnutí, kdy se kotva nepohybuje a cívka je trvale připojena ke zdroji. Na počátku se ještě mění proud a zvětšuje se do hodnoty ustáleného stavu  $I_\infty$  (křivka 3 na Obr. 4). Nezmění-li se obvod elektromagnetu, zůstává pak proud konstantní. Doba sepnutí závisí na provozních požadavcích zařízení, v němž elektromagnet pracuje. Oteplení cívky nesmí v této době překročit dovolenou hodnotu.

Kotva se vrací do výchozí polohy opět ve dvou obdobích. V prvním se zmenšuje proud po odepnutí od zdroje do proudu rozběhu  $i''_{roz}$ , kdy se vyrovnává elektromagnetická síla (vytvořená magnetickým tokem) s mechanickou silou, působící opačným směrem, takže kotva začíná odpadávat. Příslušná doba odpadu se označuje jako  $t''_{roz}$ ; závisí na zátěži elektromagnetu, způsobu vypínání cívky, případném vlivu vířivých proudů v masívních částech obvodu elektromagnetu atd. Pohyb kotvy do počáteční polohy pak probíhá během doby pohybu  $t''_{poh}$ , jež spolu s dobou odpadu určuje dobu působení elektromagnetu  $t''_p$  při vypínání (vypínací dobu). Pracovní cyklus končí obdobím, kdy je elektromagnet odpojen od zdroje a nastává jeho ochlazování. [1]

Průběh magnetizace elektromagnetu během přitahování kotvy zachycuje průběh dynamické charakteristiky na Obr. 5.

Úsek 0–1 odpovídá magnetizaci kotvy ve výchozí poloze  $s_p$ , úsek 3–4 podobně odpovídá konečné poloze kotvy  $s_k$ , úsek křivky 1–2–3 udává průběh přechodové charakteristiky. Čárkovaně jsou vyznačeny křivky  $s_k$  a  $s_p$ , podle nichž by se měnil magnetický tok při setrvání kotvy v konečné poloze  $s_k$ , případně ve výchozí poloze  $s_p$ .

Vybarvená plocha, ohraničená křivkou 0–1–2–3–4– $\psi_\infty$ –0, odpovídá energii  $W_m$ , která je přeměňována na energii magnetického pole (při zvyšování proudu z počáteční nulové hodnoty na hodnotu  $i$ ), a která je tvořena spřaženým magnetickým tokem  $\psi$  (křivka 0–1–2–3–4). [1]

Tato energie je dána vztahem:

$$W_m = \int_0^\psi i \, d\psi \quad (3)$$

Energie  $W_m$  je rozdělena do třech období tvořené plochami, které korespondují s energiemi  $W_{0-1}$ ,  $W_{1-3}$ ,  $W_{3-4}$  a energiemi skrze období  $W_{0-1'-3}$  a  $W_{0-3-1'}$ .

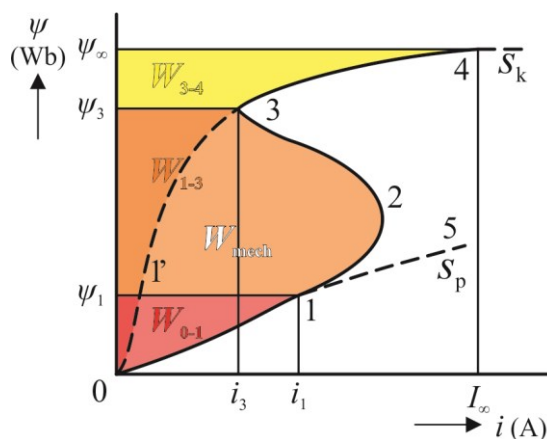
V prvním období, tvořené červeně zbarvenou plochou o energii  $W_{0-1}$ , kotva elektromagnetu nemění svoji počáteční polohu  $s_p$ , jelikož elektromagnetická síla nedostačuje k překonání odporu zátěže. Spřažený magnetický tok  $\psi$  se zvyšuje na hodnotu  $\psi_1$  podle charakteristiky  $s_p$  (křivka 0–1–5).

V okamžiku, kdy proud dosáhne velikosti  $i_1$ , se kotva začíná pohybovat až do chvíle, kdy proud společně se spřaženým magnetickým tokem dosáhnou příslušné velikosti  $i_3$ ,  $\psi_3$ . V tomto druhém období, tvořené oranžově zbarvenou plochou o energii  $W_{1-3}$ , se kotva pohybuje mezi počáteční  $s_p$  a konečnou polohou  $s_k$ . Energie druhého období  $W_{1-3}$  je větší než energie předchozího období  $W_{0-1}$ .

V bodě 3 nastává konec pohybu kotvy, avšak proud se se spřaženým magnetickým tokem stále zvyšuje podle magnetizační charakteristiky  $s_k$  až na hodnoty ustáleného stavu  $I_\infty$ ,  $\psi_\infty$ . Toto období je tvořené žlutě zbarvenou plochou o energii  $W_{3-4}$ , která je nižší než energie  $W_{1-3}$ .

V konečné poloze kotvy  $s_k$  je energie magnetického pole budící cívky elektromagnetu určena magnetizační křivkou probíhající body 0–1'–3–4, tedy o plochu tvořené energií  $W_{0-1'-3}$ .

Část energie  $W_{0-3-1'}$ , ohraničená křivkou 0–1–2–3–1'–0, je rovna mechanické energii  $W_{mech}$ , která odpovídá vynaložené práci k překonání sil působících proti přemístění kotvy z počáteční polohy  $s_p$  do konečné polohy  $s_k$ . [1]



Obr. 5. Průběh dynamické charakteristiky [1]

Mechanická energie se projeví v podobě přitažlivé síly elektromagnetu, která se určí dle rovnice:

$$F_e = \frac{dW_{\text{mech}}}{ds} \quad (4)$$

Vlivem elektromagnetické indukce se při nekonečně malém posuvu  $ds$  nezmění spřažený magnetický tok. [1]

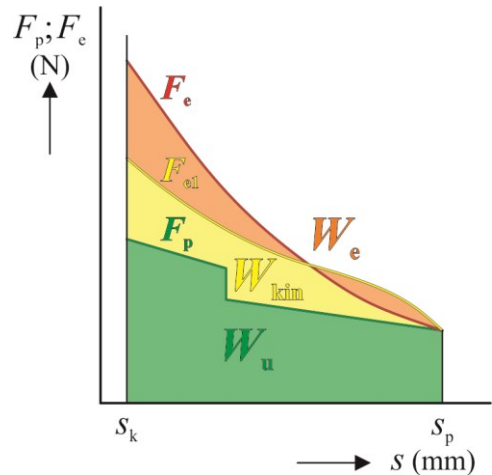
### Elektromechanická charakteristika

Práce vykonaná elektromagnetickou silou udává plocha o energii  $W_u$ , která se nachází pod průběhem elektromechanické charakteristiky v rozsahu změny polohy kotvy, viz vztah (5) a vyznačená zelená oblast na Obr. 6.:

$$W_u = \int_{s_p}^{s_k} F_p ds \quad (5)$$

Plocha  $W_u$  představuje užitečnou energii, plocha  $W_{\text{kin}}$  udává kinetickou energii pohybujících se částí, která se při náhlém zastavení kotvy (po dosažení konečné polohy  $s_k$ ) mění v teplo a dále ovlivňuje charakter pohybu kotvy a tedy i dobu přitahu. Veličina  $W_e$  představuje energii, kterou by bylo možno využít při nekonečně pomalém pohybu kotvy, tzn., kdyby bylo možné popisovat funkci elektromagnetu na základě statické charakteristiky.

Zanedbají-li se hysterezní ztráty, ztráty vířivými proudy a ztráty způsobené třením, rovná se kinetická energie  $W_{\text{kin}}$  pohybujících se součástí energii způsobené indukovaným napětím:



Obr. 6. Elektromechanická charakteristika elektromagnetu [1]

$$W_{\text{kin}} = m \cdot \frac{v_k^2}{2} = W_e = (W_{\text{mech av}} - W_{\text{mech dyn}}) = \frac{1}{2} \cdot (W_{\text{mech av}} - W_u) \quad (6)$$

Z celkové energie, která se v elektromagnetu mění na mechanickou, lze považovat za užitečnou jen tu část, která odpovídá skutečně vykonané práci, tedy při posuvu zátěže (břemena). Může se proto zavést tzv. *činitel využití konstrukce elektromagnetu* udávající stupeň využití mechanické energie:

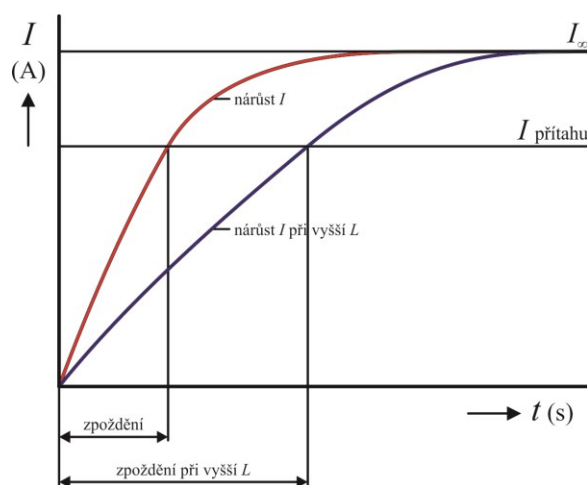
$$\chi_{\text{mech}} = \frac{W_u}{W_{\text{mech}}} \quad (7)$$

Čím vyšší vyjde hodnota činitele, tím více se bude průběh elektromechanické charakteristiky přibližovat průběhu statické charakteristiky. [1]

### Způsob změny doby působení elektromagnetu

Doba působení elektromagnetu se může vhodně regulovat za pomoci spínání řídicího obvodu při různých zapojení řídicí cívky elektromagnetu k napájecímu zdroji či konstrukční úpravou magnetického obvodu přístroje. [1]

Síla působení elektromagnetu je závislá na proudu procházejícím cívkou a tím i na magnetomotorickém napětí, jejichž nárůst i zánik má exponenciální charakter. Při nepřesyceném feromagnetiku se může považovat indukčnost vinutí elektromagnetu za konstantní hodnotu a časový nárůst je poté možné vyjádřit jako:



Obr. 7. Průběh působení proudu ve vinutí elektromagnetu v čase [6]

$$i = \frac{U}{R} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad (\text{A; V, } \Omega, \text{ H, s}) \quad (8)$$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (9)$$

Ze vztahu (8) a (9) plyne, že vhodným poměrem hodnot  $L/R$  lze podstatně prodloužit či zkrátit dobu zpoždění elektromagnetu. [6]

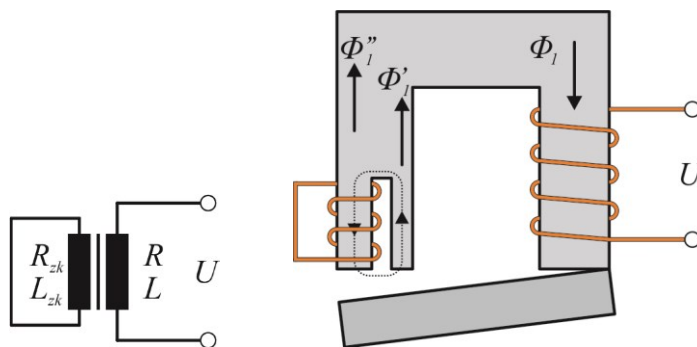
Dle rychlosti reakce stejnosměrných elektromagnetů, po sepnutí obvodu, se dělí na elektromagnety: [1]

- 1) *S běžnou rychlostí působení* ( $t_p < 150 \text{ ms}$ )
- 2) *Zpožděné* ( $t_p > 250 \text{ ms}$ )
- 3) *Rychle reagující* ( $t_p < 50 \text{ ms}$ )

**Ad. 2)** Zpožděním se rozumí časová prodleva od okamžiku zapnutí (vypnutí) do začátku pohybu kotvy. Vliv na rychlost reakce má indukčnost elektromagnetu, resp. indukčnost celého obvodu elektromagnetu. [6]

Prodloužení doby působení je možné použitím různých konstrukcí elektromagnetu, které způsobují mechanické tlumení pohybu kotvy a tím prodlužují dobu  $t_{\text{poh}}$ . Častěji se užívá tzv. přídavného vinutí spojeného nakrátko (viz Obr. 8), jímž se zvyšuje doba rozběhu  $t_{\text{rozb}}$ .

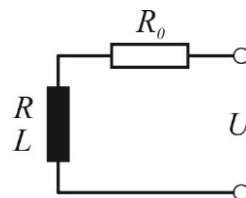
Toto vinutí je zpravidla tvořeno masivním měděným závitem nakrátko (kroužkem), který je uložen těsně na magnetickém obvodě vedle čela cívky. Vířivé proudy, indukované v závitu při zapínání či vypínání elektromagnetu, zpomalují změnu magnetického toku  $\Phi$  a tím se prodlužuje doba působení při přitahu nebo odpadu kotvy. Větší vliv však působí na odpadnutí kotvy, jelikož počáteční vzduchová mezera v obvodu je menší a tedy indukčnost cívky je vyšší. Tímto elektromagnetickým tlumením se dosahuje zpoždění odpadu kotvy za 6 – 10 s. [1], [6]



Obr. 8. Schéma zapojení obvodu a uspořádání elektromagnetu se závitem nakrátko [1], [6]

Pokud nejde o závit nakrátko, bývá přidavné vinutí často připojováno na činný odpor nebo kondenzátor. Další možností prodloužení doby zpoždění je vhodné zapojení vinutí elektromagnetu.

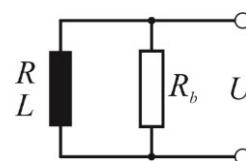
V případě, že nelze měnit budící napětí  $U$ , může se zvýšit doba rozběhu  $t_{\text{rozb}}$  přidavným odporem  $R_0$  zapojeným do série k budícímu vinutí. Ta se prodlouží rovněž i indukčností zapojenou do série, která neovlivní ustálenou hodnotu budícího proudu, ale zpomalí jeho časový nárůst. [1]



Obr. 9. Schéma zapojení obvodu elektromagnetu s předřadným sériovým odporem [1], [6]

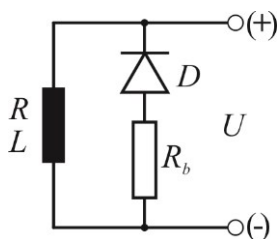
Dále je možné použít paralelní odpor  $R_b$ , kde je doba přitahu stejná jako bez odporu, a kde po odpojení vinutí od napájecí sítě klesá hodnota budícího proudu s časovou konstantou:

$$\tau = \frac{L}{R + R_b} \quad (10)$$

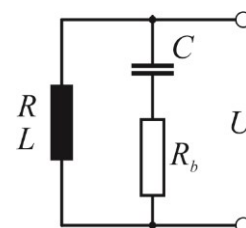


Obr. 10. Schéma zapojení obvodu elektromagnetu s paralelně zapojeným odporem [1], [6]

Při odpadu kotvy tedy dojde ke zpoždění a současně k omezení přepětí odporem  $R_b$  vznikající při odpojení elektromagnetu na jeho vinutí. Pokud je  $R_b \leq R$ , k přepětí nedojde. Zmenšením hodnoty odporu  $R_b$  se dosahuje vyššího zpoždění, avšak se navyšuje příkon elektromagnetu, který je odebrán po celou dobu připojení na napájecí síť. V tomto případě se zapojení upraví tak, že k odporu  $R_b$  bude zapojena polovodičová dioda či kondenzátor. Pro správnou funkci elektromagnetu je nutné zajistit dostatečné tlumení výsledným odporem  $R + R_b$ . [1], [6]



Obr. 11. Schéma zapojení obvodu elektromagnetu s paralelně zapojenou diodou [1], [6]



Obr. 12. Schéma zapojení obvodu elektromagnetu s paralelně zapojeným kondenzátorem [1], [6]

**Ad. 3)** Zkrácení doby působení je možné z konstrukčního hlediska buď omezením vířivých proudů, jakožto výběrem vhodného materiálu s velkou hodnotou měrného odporu a složením magnetického obvodu z elektrotechnických plechů o co nejmenší tloušťce, nebo snížením hmotnosti pohybujících se částí elektromagnetu a omezením tření v ložiscích, v nichž je uložena kotva.

Doba rozběhu elektromagnetu při zapínání se určí ze vztahu:

$$t'_{\text{rozb}} = T'_{\Phi} \cdot \ln \left( \frac{0,68 \cdot I_{\infty}}{I_{\infty} - i'_{\text{rozb}}} \right) \quad (11)$$

Vztah (11) platí pro konstrukci magnetického obvodu z plného materiálu a respektuje tedy vliv vířivých proudů.

Konstanta  $T'_{\Phi}$  se pro elektromagnet s kruhovým průřezem určí ze vztahu:

$$T'_{\Phi} = \frac{l \cdot r^2 \cdot \mu_0}{5,8 \cdot \rho \cdot \delta_p} \quad (12)$$

Pro elektromagnet s obdélníkovým průřezem se vztah (12) upraví na vztah:

$$T'_{\Phi} = \frac{l \cdot (a^2 \cdot b^2) \cdot \mu_0}{\pi^2 \cdot \rho \cdot \delta_p \cdot (a^2 + b^2)} \quad (13)$$

Zkrácení doby působení, z hlediska zapojení řídicího obvodu elektromagnetu, je možné následujícími úpravami vyobrazenými na schématech *Obr. 9*, *Obr. 13* až *Obr. 15*. [1]

Dobu rozběhu je možné zkrátit vřazením předřadného odporu  $R_0$  do série s vinutím elektromagnetu, obdobně jako u zpoždění doby přitahu na *Obr. 9*, přičemž se však současně zvýší napájecí napětí k zachování původní hodnoty proudu v ustáleném stavu, z důvodu dosažení potřebného magnetomotorického napětí pro přitah. [1], [6]

Tento proud je dán rovnicí:

$$I_{\infty} = \frac{U}{R + R_0} \quad (14)$$

Pro okamžitou hodnotu budícího proudu platí:

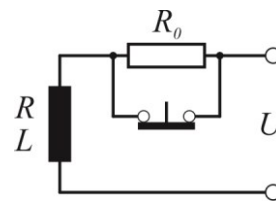
$$i = I_{\infty} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{R+R_0}{L} \cdot t} \right) \quad (15)$$

$$\tau = \frac{L}{R + R_0} \quad (16)$$

Navyšování hodnoty předřadného odporu  $R_0$  není možné do nekonečna, neboť je zapotřebí úměrně zvyšovat hodnotu napájecího napětí, čímž roste i příkon elektromagnetu. Aby nebylo zapotřebí vyššího provozního napětí, přepočítává se cívka elektromagnetu na úměrně nižší napětí se stejným magnetomotorickým napětím. [6]

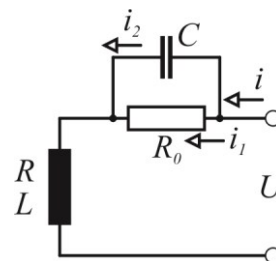


Zapojení na Obr. 9 je možné opatřit i příslušným rozpínacím kontaktem spojeným s kotvou elektromagnetu, který vyzkratuje předřadný odpor  $R_0$  a až na konci zdvihu kotvy tento odpor zařadí do obvodu – ten zajistí spolehlivé přitažení kotvy (Obr. 13). Toto zapojení se užívá v případě potřebného zmenšení rozměrů elektromagnetu a dosažení co nejmenší hmotnosti přístroje. Konstrukční nevýhodu představuje přidavný pomocný kontakt.



Obr. 13. Schéma zapojení obvodu s předřadným odporem a rozpínacím kontaktem [1]

Další možností zkrácení doby rozběhu je zmenšením časové konstanty obvodu, která je ovlivněna za pomoci kondenzátoru  $C$ . Kondenzátor na počátku přechodového děje zkratuje předřadný odpor  $R_0$  a zrychluje tím nárůst proudu v budícím vinutí (Obr. 14).



Obr. 14. Schéma zapojení obvodu elektromagnetu s předřadným odporem a kondenzátorem [1]

Pro časový interval mezi připojením napájecího napětí a okamžikem počátku pohybu kotvy platí rovnice:

$$U = R \cdot i + R_0 \cdot i_1 + L \frac{di}{dt} \quad (17)$$

$$R_0 \cdot i_1 = \frac{1}{C} \int i_2 dt \quad (18)$$

$$i = i_1 + i_2 \quad (19)$$

K zamezení vzniku kmitů v obvodu při přechodném ději je třeba splnit podmínku vycházející z rovnic (17), (18) a (19):

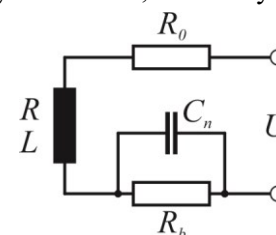
$$(L + R \cdot R_0 \cdot C)^2 > 4 \cdot R_0 \cdot L \cdot C \cdot (R + R_0)$$

Optimální velikost kapacity  $C$ , při níž vychází nejkratší doba působení elektromagnetu, se stanoví jako:

$$C_{\text{opt}} = \frac{L \cdot 10^6}{R \cdot R_0} \quad (\mu\text{F}; \text{H}, \Omega) \quad (20)$$

Nevýhodou tohoto zapojení je příliš velká hodnota kapacity  $C_{\text{opt}}$  a zvýšení příkonu elektromagnetu. [1] Za pomoci obdobného zapojení jako na Obr. 14, s větším množstvím kondenzátorů  $C_n$ , lze dosáhnout rychlého přitahu i tzv. rázovým buzením, kde se využívá jejich výbojů (Obr. 15).

Kondenzátory jsou nabíjeny na několiknásobek jmenovitého napětí elektromagnetu a vybíjí se přes jeho budící vinutí. Tímto způsobem je možné dosáhnout až pětinasobku zkrácení doby přitahu. [6]



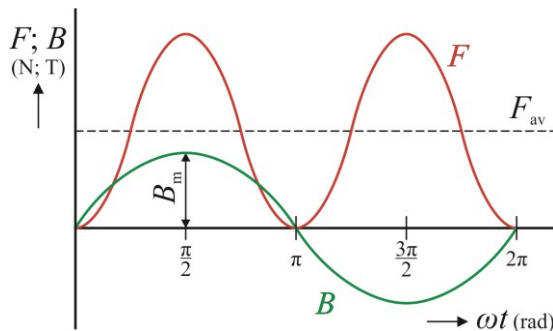
Obr. 15. Schéma zapojení obvodu s předřadným sériovým odporem a kondenzátory [6]



### 2.1.2. *Střídavé (AC) elektromagnety*

Elektromagnet, jehož budicí vinutí je napájeno ze zdroje střídavého napětí, nachází velmi široké uplatnění. Magnetický tok se mění nejen co do velikosti, ale i směru, takže elektromagnetická síla pulsuje mezi krajními hodnotami – nulou a maximem – s dvojnásobným kmitočtem v porovnání s kmitočtem napájecího zdroje (pulzace je užívána např. při konstrukci vibrátorů, elektromagnetických kladiv apod.).

U přidržných elektromagnetů je však zmenšení přitažlivé síly pod určitou úroveň nepřipustné, neboť způsobuje chvění kotvy a v některých případech i znemožňuje správnou činnost elektromagnetu. Proto se musí v těchto případech použít zvláštních opatření, kterými se omezuje pulzace magnetického toku – konstrukce a charakteristiky těchto elektromagnetů se pak značně liší od stejnosměrných elektromagnetů.



Obr. 16. Časové průběhy přitažlivé síly a magnetické indukce [1]

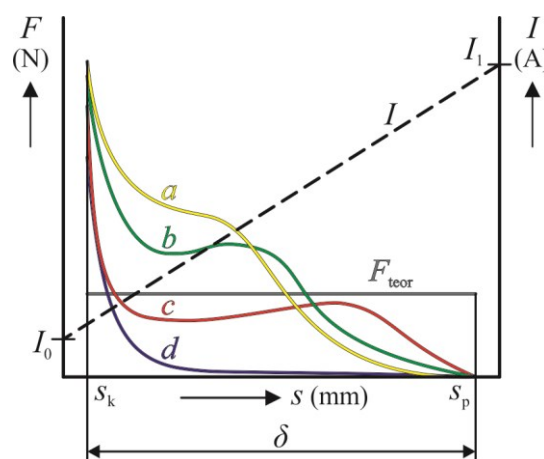
K omezení pulsační přitažlivé síly se užívá složitějšího magnetického obvodu, ve kterém jednotlivými větvemi procházejí magnetické toky se vzájemným fázovým posuvem (2 fázové a 3 fázové elektromagnety). U jednofázového elektromagnetu se používá tzv. závit nakrátko (viz Obr. 8), nebo polovodičová technika. [1]

#### **Statická tahová charakteristika**

Při zanedbání rozptylu jsou magnetický tok a indukce stále, a proto i síla je při každém zdvihu konstantní. Jen u větších zdvihů se působením rozptylu zmenšuje. Stálá síla pro velkou část zdvihu je velkou předností střídavých elektromagnetů.

Zmenšování velikosti vzduchové mezery se však zvětšuje reaktance vinutí a proud elektromagnetu klesá. Nejmenší proud je v přitaženém stavu a jeho změna je téměř lineární. Poměr proudového nárazu při zapnutí proudu  $I_1$  (proud záťahový) k proudu naprázdno  $I_0$  je značný. Samočinný pokles proudu v zapnuté poloze je výhodný, neboť umožňuje trvalý chod magnetu bez speciálního přídavného zařízení. [5]

Modrý průběh tahové charakteristiky (d) na Obr. 17 patří konstrukci elektromagnetu s vnější přitažnou kotvou, ostatní průběhy (a, b, c) náleží konstrukcím elektromagnetu s vnější vtahující se kotvou a šedý průběh ( $F_{\text{teor}}$ ) znázorňuje teoretický průběh přitažné síly.



Obr. 17. Různé průběhy tahové charakteristiky AC elektromagnetu [1], [5]

### 2.1.3. Porovnání charakterů DC a AC elektromagnetů

#### **Přitažlivá síla**

Střední hodnota přitažlivé síly (při dané dosedací ploše pólů) je u střídavého elektromagnetu poloviční oproti střední hodnotě stejnosměrného elektromagnetu – využití železného jádra při střídavém buzení je v nejlepším případě poloviční, než když použijeme stejnosměrný budicí proud. Tato skutečnost platí pro jednofázové i několikafázové provedení elektromagnetu.

Základní zjednodušený vzorec pro výpočet přitažlivé síly je pro oba elektromagnety následující:

$$F = \frac{B^2 \cdot S}{2 \cdot \mu_0} = \frac{\Phi^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot S} \quad \left( \text{N}; \text{T}, \text{m}^2, \text{H} \cdot \text{m}^{-1}; \text{Wb}, \text{H} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}^2 \right) \quad (21)$$

#### **Tíha**

Při dané přitažlivé síle a zdvihu kotvy vychází střídavý elektromagnet hmotnostně těžší, a to jednak vlivem využití feromagnetika (které je poloviční) a jednak vzhledem k potřebnému zdánlivému příkonu elektromagnetu vychází větší i objem vinutí.

#### **Nezbytný minimální jalový příkon**

Jalový příkon odebíraný střídavým elektromagnetem v okamžiku připojení na síť je jednoznačně určen požadovanou mechanickou prací kotvy a nelze ho zmenšit zvětšením rozměrů přístroje. U stejnosměrných elektromagnetů toto neplatí – příkon můžeme zmenšit zvětšením rozměrů elektromagnetu (neuvažuje-li se rychlost působení).

#### **Vliv vířivých proudů**

Ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní způsobují oteplení střídavého elektromagnetu. Při stejnosměrném napájení tato složka ztrát odpadá.

Ztráty způsobené vířivými proudy lze u střídavých elektromagnetů zmenšit vhodnou konstrukcí magnetického obvodu, například užitím tenkých elektrotechnických plechů válcovaných za studena se značným měrným odporem, kterým se určí tvar magnetického obvodu, který je obvykle čtvercový nebo obdélníkový a způsobí horší objemové využití – to vede ke zvýšení střední délky závitu, jež způsobuje některé konstrukční a technologické problémy. U stejnosměrných elektromagnetů se tento materiál používá pro přístroje, které jsou určeny pro co nejrychlejší působení, viz polarizované elektromagnety.

#### **Oblasti použití**

V běžných průmyslových zařízeních napájených ze sítě 50 Hz dostatečného výkonu nejsou mnohé z uvedených nevýhod střídavých elektromagnetů podstatné a nebrání jejich použití. Velký jalový příkon na počátku zdvihu kotvy se neprojevuje u jiných spotřebičů. Jestliže je vzduchová mezera na konci zdvihu nepatrná, je příkon elektromagnetu ze sítě v sepnutém stavu poměrně malý. [1]

Z hlediska proudových poměrů, jejich vlivu na silové poměry, rozměrů a využití magnetických obvodů jsou výhodnější elektromagnety stejnosměrné než střídavé. [2]

## 2.2. Polarizované elektromagnety

Činnost těchto elektromagnetů, na rozdíl od klasických elektromagnetů, závisí nejen na velikosti, ale i na samotné polaritě budicího proudu. V magnetickém obvodu polarizovaných elektromagnetů se uplatňují dva magnetické toky – *řídící* a *polarizační*. *Polarizační tok* je možné vytvořit druhým budícím vinutím, avšak se zpravidla k jeho vytvoření používají permanentní magnety (kotva se udržuje stále v jedné krajní poloze, aniž by bylo zapotřebí trvalé dodávky elektrické energie). I když budicí cívku elektromagnetu neprochází řídící proud, vzniká působením polarizačního toku stálá určitá přitažlivá síla. Kotva se začne pohybovat bezprostředně ihned po vzniku proudu v řídícím vinutí.

Polarizační tok ovlivňuje hlavně rychlost působení přístroje, a to právě tím, že se pole během pracovního cyklu nezvětšuje z nuly do maxima a pak opět nezaniká. Doba zapnutí je u polarizovaných elektromagnetů podstatně kratší než u nepolarizovaných, a to v rozmezí **1 – 3 ms**. Příznivě se v tomto případě projevuje, kromě elektromagnetických poměrů budicí cívky (malá hodnota časové konstanty), také nepatrný zdvih kotvy a velmi lehká hmotnost kotvy. K omezení vlivu vířivých proudů se dokonce i u polarizovaných elektromagnetů (jakožto typu stejnosměrných elektromagnetů) používá magnetický obvod složený s tenkých elektrotechnických plechů válcovaných za studena. [1], [2]

Polarizované elektromagnety se používají pro velmi rychle působící relé, například v převodnicích elektrického signálu na změnu polohy, rychlovypínačích, proudových chráničích atp., a eventuálně i tam, kde dochází ke spínání obvodů velmi zřídka. Z konstrukčního hlediska se polarizované elektromagnety dělí na skupiny elektromagnetů se *sériovým*, *paralelním* či *můstkovým* magnetickým obvodem. Tyto skupiny konstrukcí mohou zahrnovat více možných nastavení poloh kotvy – třípolohové, dvoupolohové nebo dvoupolohové s jednostranným nastavením. [1]

### Třípolohový elektromagnet

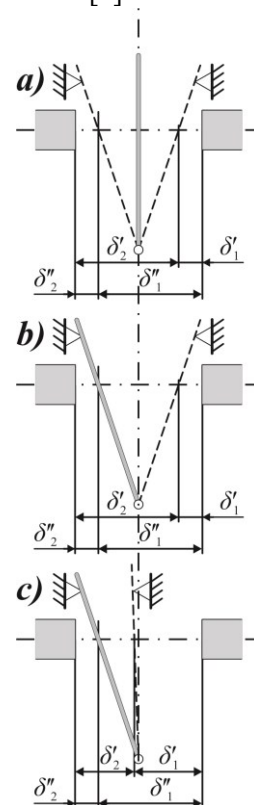
Kotva se při nulovém řídícím proudu nachází ve střední poloze mezi oběma krajními polohami (Obr. 18, a). Podle směru řídícího proudu se pak přemístí do jedné nebo druhé krajní polohy.

### Dvoupolohový elektromagnet

U elektromagnetu bez jednostranného nastavení zaujímá kotva při nulovém řídícím proudu vždy jednu z krajních poloh podle toho, jakým směrem předtím procházel řídící proud (Obr. 18, b). Přeloží se do druhé krajní polohy jen v případě, že řídícím vinutím prochází proud opačného směru, než měl proud při předchozí změně polohy kotvy. Po vypnutí řídícího proudu zůstává kotva trvale v klidu.

### Dvoupolohový elektromagnet s jednostranným nastavením

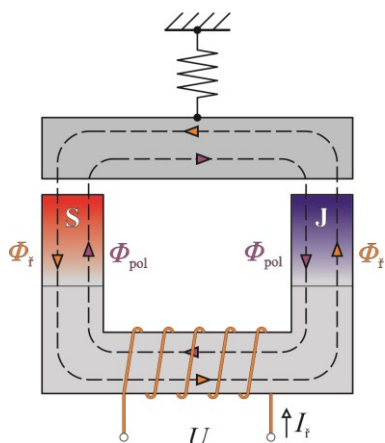
Kotva spočívá v období klidu vždy ve stejné výchozí poloze (na zarážce). K jejímu pohybu dojde pouze při správné polaritě řídícího proudu (Obr. 18, c). Jakmile řídící proud klesne na nulovou hodnotu, kotva se vrátí do počáteční klidové polohy za pomoci přivedené cizí mechanické či elektrické energie (pružina, výboj z kondenzátoru C). [1], [2]



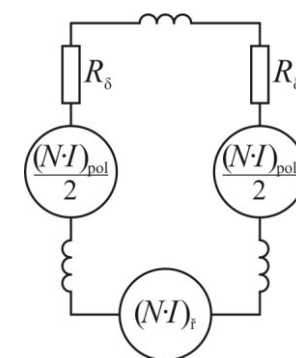
Obr. 18. Kotva elektromagnetu s různým nastavením [1]

### 2.2.1. Polarizované elektromagnety se sériovým magnetickým obvodem

V elektromagnetech tohoto druhu existuje pouze jediná cesta, kterou prochází magnetický tok z nepohyblivé části magnetického obvodu do kotvy a zpět. Po této dráze se uzavírají oba dílčí magnetické toky, polarizační a řídicí, přičemž mají ve vzduchových mezerách stejný směr. Podle směru budicího proudu se tedy obě magnetomotorická napětí (polarizační a řídicí) v obou vzduchových mezerách buď sčítají, nebo odečítají. Jestliže magnetické toky směřují proti sobě, je výsledný magnetický tok menší než v případě, kdy působí pouze polarizace magnetu. Pokud se sčítají, dosáhne výsledný tok takové velikosti, že se kotva přitáhne k nepohyblivé části magnetického obvodu. K návratu kotvy do výchozí polohy se využívá tahu pružiny, zajišťující rovněž stabilní polohu kotvy ve vypnutém stavu, kdy je vzduchová mezera největší. [1]



Obr. 19. Polarizovaný elektromagnet se sériovým magnetickým obvodem [2]



Obr. 20. Náhradní schéma polarizovaného elektromagnetu se sériovým magnetickým obvodem [1]

V případě naznačeném na Obr. 19 je polarizační tok  $\Phi_{pol}$  dán permanentním magnetem. Protože jde o uspořádání se sériovým magnetickým obvodem, prochází magnetický tok řídicího vinutí  $\Phi_f$  tělesem permanentního magnetu. Magnetická vodivost materiálů, z nichž se zhotovují permanentní magnety, však bývá podstatně menší, než je vodivost měkké oceli. Z toho důvodu vzniká na cestě magnetického toku, probíhající permanentním magnetem, značný úbytek části řídicího magnetomotorického napětí budicího vinutí. Citlivost elektromagnetů konstruovaných tímto způsobem je tedy proto malá.

Podstatnou další nevýhodou jsou i nepříznivé pracovní podmínky permanentního magnetu, který je vystaven silné demagnetizaci způsobené řídicím tokem. To vede k nutnosti zvětšit objem permanentního magnetu i celkového objemu elektromagnetu. [1], [2]

Uvedené potíže v sériových magnetických obvodech odpadají, pokud se dosahuje polarizace pomocí zvláštního budicího vinutí. Tento typ polarizovaných magnetů se používá např. v automatických vypínačích. V magnetickém obvodu, v němž polarizaci vytváří budicí cívka, vzniká výsledný magnetický tok určený výsledným magnetomotorickým napětím polarizačního a řídicího vinutí:

$$\Phi = \frac{\sum F_m}{\sum R} = \frac{\sum (N \cdot I)}{R_\delta + R_{Fe}} \quad (\text{Wb}; -, \text{A}, \text{H}^{-1}) \quad (22)$$

Pro zjednodušení rozboru se můžou zanedbat rozptylové magnetické toky, okrajový nehomogenní tok ve vzduchových mezerách a odpor železa. Poté se může magnetický tok vyjádřit rovnicí:

$$\Phi = \frac{(N \cdot I)_{\text{pol}} \pm (N \cdot I)_{\text{i}}}{R_{\infty}} \quad (23)$$

kde kladné znaménko platí pro stejný smysl obou magnetomotorických napětí, záporné znaménko pro jejich opačný smysl.

Přitažlivá síla, působící na kotvu v její ose, se může stanovit podle Maxwellovy rovnice a upravit dle vztahů (22) a (23) na vztah:

$$F_e = 3,98 \cdot 10^5 \cdot \frac{\Phi^2}{S} = 3,98 \cdot 10^5 \cdot \frac{[(N \cdot I)_{\text{pol}} + (N \cdot I)_{\text{i}}]^2}{R_{\infty}^2 \cdot S} \quad (\text{N; Wb, m}^2; -, \text{A, H}^{-1}, \text{m}^2) \quad (24)$$

V případě, že vinutím cívky neprochází proud, bude platit:

$$F_{e0} = 3,98 \cdot 10^5 \cdot \frac{(N \cdot I)_{\text{pol}}^2}{R_{\infty}^2 \cdot S} = 3,98 \cdot 10^5 \cdot \frac{(N \cdot I)_{\text{pol}}^2}{(R_{\delta} + R'_{\delta})^2 \cdot S} \quad (25)$$

A proto je dle vztahu (25):

$$F_{e0} = \frac{k}{\delta^2 + 2A\delta + A^2} = \frac{k}{(\delta + A)^2} \quad (26)$$

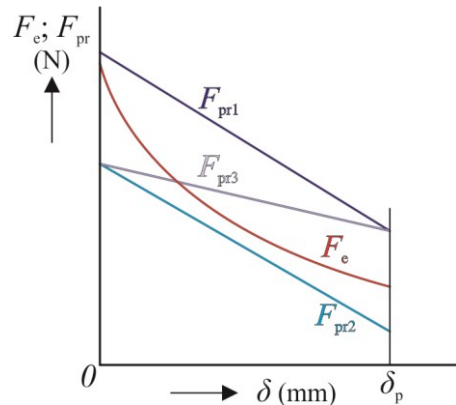
kde:

$$k = 1,57 \cdot 10^{-7} \cdot (N \cdot I)_{\text{pol}}^2 \cdot S, \quad A = R'_{\delta} \cdot S \cdot \mu_0$$

Závislost mezi přitažlivou silou, způsobovanou polarizací a délkou vzduchové mezery, je popsána křivkou druhého stupně. Pro  $\delta \rightarrow \infty$  se velikost síly blíží k nule, pro  $\delta = -A$  se velikost síly blíží k nekonečnu, a pro  $\delta = 0$  dosahuje síla velikosti (Obr. 21, křivka  $F_e$ ): [1]

$$F_e = 3,98 \cdot 10^5 \cdot \frac{(N \cdot I)_{\text{pol}}^2}{R'_{\delta} \cdot S}$$

Ve stejném diagramu na Obr. 21 jsou naznačeny možné charakteristiky vratné pružiny (křivky  $F_{\text{pr1}}$ ,  $F_{\text{pr2}}$ ). Má-li pružina charakteristiku  $F_{\text{pr1}}$ , zaujme kotva při odpojení řídicím vinutí vždy krajní polohu s maximální vzduchovou mezerou  $\delta_p$ . Aby došlo k přitažení kotvy do druhé polohy, musí působit obě magnetomotorická napětí ve stejném smyslu. Směřují-li proti sobě, zůstane kotva v klidu.



Obr. 21. Elektromechanické charakteristiky polarizovaného elektromagnetu se sériovým magnetickým obvodem [1]

Při použití pružiny s charakteristikou  $F_{\text{pr2}}$  zůstává kotva v klidu v poloze odpovídající minimální vzduchové mezeře  $\delta = 0$ . K pohybu kotvy dojde tehdy, jestliže obě magnetomotorická napětí působí proti sobě (uspořádání používané obvykle u automatických vypínačů).

Má-li pružina charakteristiku s průběhem  $F_{pr3}$ , může kotva zaujmout v klidu dvě stabilní polohy podle směru budícího proudu v předcházejícím období. Má-li pak dojít k přeložení kotvy z polohy odpovídající maximální vzduchové mezeře, musí souhlasit směr obou magnetomotorických napětí, kdežto v případě, že kotva spočívala v poloze, kdy vznikala minimální vzduchová mezera, musí působit magnetomotorická napětí proti sobě.

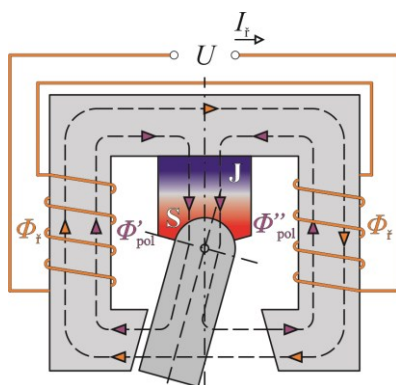
Při rychlém zvětšování řídicího proudu se magnetický tok, udržující kotvu v klidové poloze, nezmenšuje stejně rychle vlivem indukovaného napětí pohybem kotvy, který vyvolává v polarizačním vinutí proud. Pro vyloučení příslušného zpoždění se může použít zvláštní transformátor, u kterého jsou vinutí zapojena v sérii s polarizační a řídicí cívkou. Indukované napětí, vyvolané změnou magnetického toku spřaženého s polarizačním vinutím, je kompenzováno napětím vznikajícím v druhém vinutí transformátoru.

Elektromagnety se sériovým magnetickým obvodem vykazují mnoho vážných nedostatků, takže možnosti jejich využití jsou omezené. Mohou se však s výhodou použít k výkladu o zásadách rozboru chování polarizovaných elektromagnetů. [1]

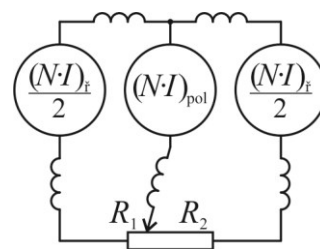
### 2.2.2. Polarizované elektromagnety s paralelním magnetickým obvodem

Elektromagnety tohoto typu se vyznačují kotvou uloženou mezi dvěma pólovými nástavci, takže magnetický tok vychází z nepohyblivé části magnetického obvodu do kotvy přes dvě vzduchové mezery. Elektromagnetická síla u konstrukcí se sériovým magnetickým obvodem působí vždy ve směru osy jádra, kdežto kotva u elektromagnetů s paralelním obvodem se nachází v působnosti dvou elektromagnetických sil, působících v různých směrech. Výsledná síla, určující pohyb kotvy, je dána rozdílem dvou složek. Proto se někdy označují tyto elektromagnety jako diferenciální.

Jestliže kotva zaujímá polohu uprostřed pólových nástavců v době, kdy řídicím vinutím neprochází proud, znamená to, že jsou obě složky stejně velké, a tedy se ruší. Kotva se vychýlí však nepatrně na jednu nebo druhou stranu, zvětší-li se jedna složka a zmenší druhá, takže se kotva přeloží do krajní polohy. Střední poloha je polohou nestabilní, kterou je možné využívat pouze v případě, je-li přístroj opatřen zvláštní přídavnou pružinou. [1]



Obr. 22. Polarizovaný elektromagnet s paralelním magnetickým obvodem [2]



Obr. 23. Náhradní schéma polarizovaného elektromagnetu s paralelním magnetickým obvodem [1]

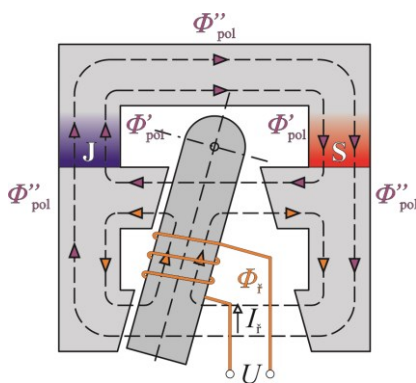


Zavede-li se do řídicího vinutí proud, zvětší se magnetický tok procházející vzduchovou mezerou z jedné strany a zmenší se tok procházející mezerou z druhé strany. Ležela-li kotva např. v levé krajní poloze a proud cívky měl správný směr, posune se nyní do pravé krajní polohy, kde opět zůstane v klidu i po odpojení budicí cívky od zdroje. Polarizovaný elektromagnet s paralelním obvodem tedy nevyžaduje pomocnou pružinu, která by zajistila klidovou polohu kotvy v případě, že řídicím vinutím neprochází proud. Pružina se používá v případě potřebného dosažení zvláštní vlastnosti, např. třípolohového elektromagnetu.

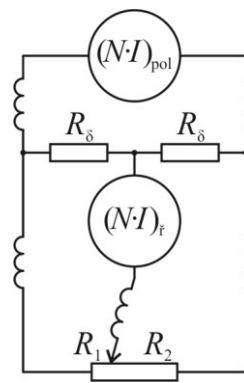
Elektromagnety s paralelním obvodem jsou dokonalejší než konstrukce se sériovým magnetickým obvodem – na kotvu působí rozdíl dvou sil ve vzduchových mezerách, přičemž jedna složka je určena součtem dvou magnetických toků a druhá jejich rozdílem. Ani u paralelních elektromagnetů nelze ovšem úplně oddělit od sebe dráhu polarizačního a řídicího magnetického toku. Výhodnější jsou v tomto směru elektromagnety, používající magnetický obvod ve tvaru můstku, v jehož úhlopříčce se nachází kotva. [1]

### 2.2.3. Polarizované elektromagnety s můstkovým magnetickým obvodem

Z hlediska sil působících na kotvu se tento typ polarizovaného elektromagnetu podobá elektromagnetu s paralelním magnetickým obvodem. Na kotvu působí opět rozdíl dvou sil, z nichž jedna je určena součtem a druhá rozdílem polarizačního a řídicího magnetického toku. V paralelním elektromagnetu však prochází polarizační magnetický tok po stejné dráze jako magnetický tok řídicí cívky, kdežto u můstkového typu jsou obě dráhy téměř úplně rozděleny a toky se skládají hlavně v prostoru vzduchových mezer. Tím vzniká jednak příznivější provozní stav permanentního magnetu, a jednak je elektromagnet citlivější na přiváděný signál.



Obr. 24. Polarizovaný elektromagnet s můstkovým magnetickým obvodem [2]



Obr. 25. Náhradní schéma polarizovaného elektromagnetu s můstkovým magnetickým obvodem [1]

Elektromechanické charakteristiky elektromagnetů s paralelním a můstkovým magnetickým obvodem se v zásadě neliší. V obecném případě se respektuje vnitřní odpor permanentního magnetu způsobující polarizaci, a dále změny magnetického toku tohoto magnetu vznikající při určité poloze kotvy a různém magnetomotorickém napětí řídicího vinutí. Pokud se respektují uvedení činitele, obsahuje výraz určující velikost přitažlivé síly tři složky. První složka je úměrná 2. mocnině magnetomotorického napětí polarizačního stejnosměrného magnetu, druhá složka součinu magnetomotorického napětí stejnosměrného magnetu a řídicího vinutí a třetí složka 2. mocnině magnetomotorického napětí řídicího vinutí. [1]

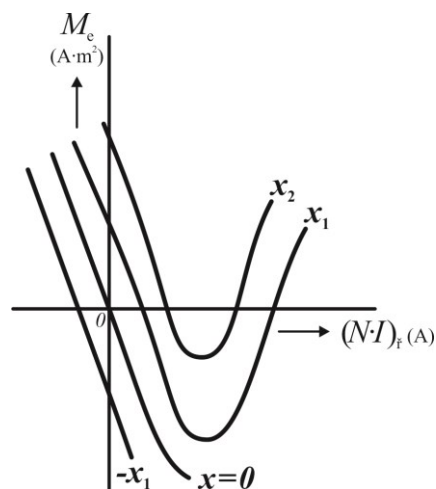
Moment, vyvozený na ose kotvy, je dán vztahem:

$$M_e = a \cdot (N \cdot I)_{\text{pol}}^2 \pm b \cdot (N \cdot I)_{\text{f}} \cdot (N \cdot I)_{\text{pol}} + c \cdot (N \cdot I)_{\text{f}}^2 \quad (27)$$

Závislost mezi momentem a magnetomotorickým napětím řídicího vinutí je vyobrazena na Obr. 26. Parametrem je poloviční rozdíl vzduchových mezer mezi kotvou a pólovými nástavci:

$$x = \frac{\delta_2 - \delta_1}{2} \quad (28)$$

V případě uvažování vzájemného poměru mezi magnetomotorickým napětím polarizačním a řídicím vinutí, obvyklý u běžných provedení elektromagnetů, není třeba téměř přihlížet ke změnám velikosti stejnosměrného toku během pohybu kotvy a kromě toho se může zanedbat ta část magnetického toku řídicího vinutí, která prochází přes permanentní magnet.

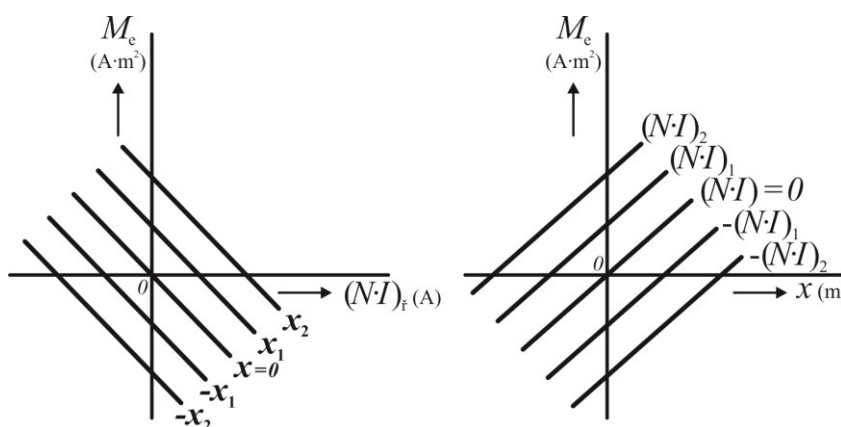


Obr. 26. Elektromechanické charakteristiky polarizovaných elektromagnetů s paralelním nebo můstkovým magnetickým obvodem [1]

Proto se může s dostatečnou přesností vyjádřit elektromagnetický moment (působící na kotvu) vztahem:

$$M_e = a_1 \cdot \Phi_{\text{pol}}^2 \cdot \frac{\delta_2 - \delta_1}{2} \pm b_1 \cdot \Phi_{\text{pol}} \cdot I_{\text{f}} \quad (29)$$

Pro výpočty v praxi lze u polarizovaných elektromagnetů vycházet z charakteristik  $M_e = f((N \cdot I)_{\text{f}})$ , majících přímkový charakter určený parametrem  $x$  z rovnice (28), nebo popř. užít charakteristik  $M_e = f_1(x)$  s parametrem  $(N \cdot I)_{\text{f}}$  (Obr. 27). Sklon přímek je dán typem magnetického obvodu, jeho rozměry a parametry řídicího i polarizačního vinutí. [1]



Obr. 27. Zjednodušené průběhy elektromechanických charakteristik [1]

Průběh charakteristik elektromagnetické a mechanické síly určuje, zda elektromagnet vykazuje chování reléového nebo proporcionálního členu.



Použije-li se pružina působící proti elektromagnetické síle řídicího vinutí, má rovnice pro elektromagnetický moment tvar:

$$M_e = (a_1 \cdot \Phi_{\text{pol}}^2 - r_p) \cdot \frac{\delta_2 - \delta_1}{2} \pm b_1 \cdot \Phi_{\text{pol}} \cdot I_{\text{ř}} \quad (30)$$

Jestliže je výraz  $(a_1 \cdot \Phi_{\text{pol}}^2 - r_p) > 0$ , chová se poté elektromagnet jako dvupolohové relé. Jako třípolohový elektromagnet se chová v případě, že výraz  $(a_1 \cdot \Phi_{\text{pol}}^2 - r_p) < 0$ . Zvětšuje-li se v případě třípolohového elektromagnetu postupně proud řídicího vinutí, chová se elektromagnet jako proporcionální člen.

Podobného chování elektromagnetu je možné i bez použití přídavné pružiny, a to vhodnou úpravou magnetického obvodu. Elektromagnet je konstrukčně řešen obvykle tak, že se během zapínacího pochodu mění vzduchová mezera mezi póly magnetického obvodu a kotvou. V tomto případě však při pohybu kotvy zůstává vzduchová mezera konstantní délky a mění se současně pouze velikost plochy pólových nástavců zakryté kotvou. Tímto způsobem lze získat různé průběhy tahových charakteristik elektromagnetu. [1]

### 2.3. Permanentní magnety

Jedná se o trvalé magnety, které si po předchozím namagnetování zachovávají svůj magnetismus buď úplně, nebo aspoň zčásti. [16]

Tento typ magnetů se používá k vytváření stálého magnetického pole v zařízeních měnících elektrickou energii na mechanickou (polarizační a elektromagnetické soustavy přístrojů, registrační přístroje, magnetrony, zaostřovací obvody, obvody ke zhášení oblouku aj.).

Ve většině případů jsou permanentní magnety užívány k silovému působení na feromagnetické materiály menších velikostí (magnetické upínání, synchronní přenos momentů, magnetické zámky, separátory, zdvihadla, atd.) nebo v konstrukcích brzdových magnetů (různé indukční soustavy elektrických přístrojů).

Pro každé individuální použití permanentního magnetu jsou vyžadovány příslušné charakteristické vlastnosti, jako třeba magnetické vlastnosti (velká koercitivní síla, remanence), teplotní závislost (hodnota Curieova bodu), mechanická pevnost, chemická odolnost, anebo obecně malá hmotnost a nízká cena. [1]

### 3. MAGNETICKÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI

Nejrůznější konstrukce a zařízení s permanentními magnety vyžadují velké množství rozdílných tvarů magnetů zhotovených z materiálů, jejichž vlastnosti se vzájemně liší. [1]

#### 3.1. Magnetizace a magnetika

Souhrnně jsou *magnetiky* označována hmotná prostředí, která jsou schopné ovlivnit magnetické pole. Vloží-li se magnetikum do vnějšího magnetického pole, dojde k fyzikálnímu jevu zvanému *magnetizace* charakterizovaný stejně zvanou vektorovou fyzikální veličinou  $M$  definovanou vztahem:

$$M = \frac{d\mathbf{m}_c}{dV} \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}; \text{A} \cdot \text{m}^2, \text{m}^3) \quad (31)$$

V případě homogenního magnetika v celém jeho objemu lze vektor magnetizace vyjádřit jako:

$$M = \frac{\sum \mathbf{m}_i}{\Delta V} \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}; \text{A} \cdot \text{m}^2, \text{m}^3) \quad (32)$$

Magnetizaci lze také vyjádřit ze vztahu: [1]

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot (M + H) \quad (\text{T}; \text{H} \cdot \text{m}^{-1}, \text{A} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (33)$$

Magnetizace  $M$  tedy vyjadřuje vektorový součet dipólových momentů vtažených na jednotku objemu. Jevy magnetismu jsou spojeny s pohybem nosičů elektrických nábojů. Elektrony rotují (spin) a obíhají kolem jádra atomu, čímž vytvářejí tzv. elementární magnetické momenty. Ty se vektorově sčítají a tvoří magnetický moment atomu. Je-li jejich vektorový součet roven nule, označuje se daná látka jako *diamagnetická*. V případě, že vektorový součet momentů je různý od nuly, jedná se poté o látky označované buď jako *paramagnetické*, *feromagnetické*, *antiferomagnetické* nebo *ferimagnetické*. [8], [9], [16]

#### **Diamagnetismus**

Diamagnetické látky se vyznačují tím, že po vložení do nestejnorodého magnetického pole působí zeslabení vnějšího magnetického pole, snižují působení magnetické indukce  $B$  a jsou z magnetického pole vypuzovány. Jejich relativní permeabilita je menší než 1 ( $\mu_r < 1$ ), není závislá na teplotě a intenzitě magnetického pole. Jedním z představitelů těchto látek jsou například Cu, Au, Ag či  $\text{H}_2\text{O}$ . Ideálním diamagnetikem jsou supravodiče. [7], [8], [10]

#### **Paramagnetismus**

Jsou to takové látky, u nichž jsou elementární magnetické momenty orientovány nejrůznějšími směry následkem tepelného pohybu molekul, čímž se tyto látky jeví jako nemagnetické. Vystavením vnějšího magnetického pole se tyto elementární magnetické momenty mohou se svými atomy orientovat do směru působení tohoto pole – magnetizace má stejný směr jako vnější budící pole.

Po vložení paramagnetických látek do nestejnorodého magnetického pole působí zesílení vnějšího magnetického pole, zvyšují působení magnetické indukce  $B$  a jsou do magnetického pole vtahovány. To platí pro látky složené z atomů s nejméně nenasycenou valenční elektronovou vrstvou (jako například  $\text{O}_2$ , Al, Pt, Ti, různé přechodové kovy, kovy ze vzácných zemin a aktinidy). Atomy

vykazují vlastní (permanentní) magnetický moment. Sousední atomy nejsou vzájemně spojeny. Relativní permeabilita je větší než 1 ( $1 + 4 \cdot 10^{-4} > \mu_r > 1 + 10^{-8}$ ) a je nepřímo úměrná absolutní teplotě.

### **Feromagnetismus**

Vyskytuje se u látek, ve kterých vedle určitého počtu elektronů ve valenční sféře elektronového obalu atomu existuje určitý poměr mezi meziatomovou vzdáleností a poloměrem atomu (Fe, Co, Ni, sloučeniny jako *AlNiCo*). Sousední atomy se sdružují paralelně a tvoří domény, čímž je dán vlastní celkový magnetický moment o určité velikosti a směru (*Obr. 28, a*).

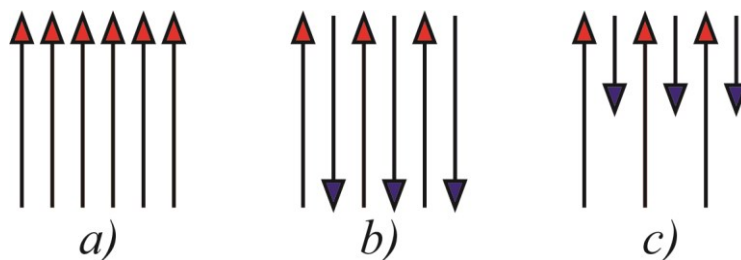
Feromagnetismus tedy není způsoben pouze magnetickými momenty jednotlivých atomů, ale magnetickými momenty domén, které vznikají, jakmile jsou atomy navzájem dostatečně blízko, takže dochází k paralelní orientaci jejich magnetických momentů. Ve feromagnetiku dochází v tzv. Weissových doménách k nasycené magnetizaci i bez vnějšího magnetického pole. V přítomnosti feromagnetických látek se velmi zvýší působení magnetické indukce  $B$ . Hodnota relativní permeability je mnohem vyšší než 1 ( $5 \cdot 10^5 > \mu_r > 100$ ). Doménová struktura feromagnetických látek souvisí s magnetizační a hysterezní křivkou, viz dále. [7], [8], [10], [16]

### **Antiferomagnetismus**

U těchto látek se tvoří elementární domény stejně jako u feromagnetik, avšak se dvěma rozdílnými podmřížkami, jejichž magnetické momenty jsou antiparalelní, tzn. opačné a stejně velké (*Obr. 28, b*). Protože opačně orientované magnetické momenty se navzájem ruší, nemají antiferomagnetika navenek žádný magnetický moment až do určité kritické (Curieové) teploty, kdy antiparalelní orientace magnetických momentů atomů zaniká. Nad kritickou teplotou se tyto látky chovají jako paramagnetika (*MnO*, *FeO*, *Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*, *FeS*, *CoO*).

### **Ferimagnetismus**

Principiálně jde o stejné látky jako antiferomagnetika, ale s nevyváženým antiparalelním uspořádáním – mají nestejně velké magnetické momenty v krystalové mřížce směřující proti sobě (*Obr. 28, c*). V podstatě jde o nevykompenzovaný antiferomagnetismus. Vyskytuje se u látek krystalické povahy. Ferimagnetika se chovají v mnohých ohledech jako feromagnetika a zařazují se společně do skupiny silně magnetických látek. Ferimagnetika mají velký technický význam, což souvisí s jejich zpravidla několikanásobně vyšším měrným elektrickým odporem, než mají kovy. Typickým představitelem této skupiny jsou ferity. [7], [8], [16]



Obr. 28. Vyobrazení směrů působení magnetických momentů u jednotlivých magnetik [8]

a) feromagnetismus; b) antiferomagnetismus; c) ferimagnetismus

Charakter feromagnetických materiálů, užívaných pro permanentní magnety nebo příslušné magnetické obvody, určuje podoba tzv. magnetizační křivky, či hysterezní smyčky.

### 3.2. Hysterezní smyčka a její parametry

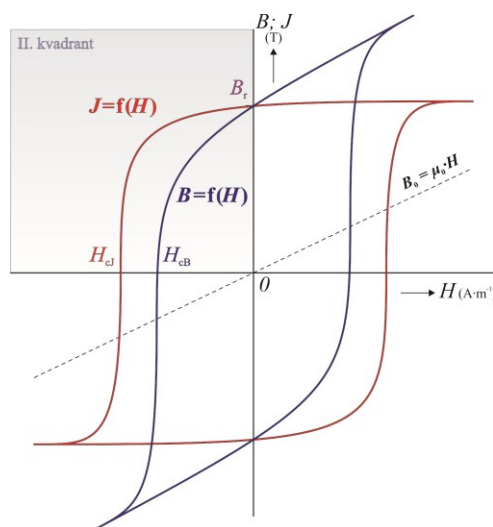
Hysterezní smyčka je odrazem změn uspořádání magnetických (Weissových) domén v materiálu. Rozlišují se v zásadě dva druhy těchto změn:

- posun doménových stěn
- rotaci vektorů magnetizace

Zatímco první mechanismus se uplatňuje zejména v oblasti nižších polí, druhý je významný v oblasti nasycení. [7]

Hysterezní smyčka se dá jednodušeji definovat jako uzavřená křivka magnetizačního cyklu, která vyjadřuje průběh magnetické indukce  $B$  v závislosti na intenzitě magnetického pole  $H$ . [10]

Pro charakterizaci základních vlastností permanentních magnetů je nejdůležitější II. kvadrant hysterezní smyčky, zvaná demagnetizační křivka. [17]



Obr. 29. Závislost  $B = f(H)$  a  $J = f(H)$  feromagnetického materiálu [7]

#### 3.2.1. Parametry

Nejen permanentní magnety, ale i jiné feromagnetické materiály, jsou zpravidla charakterizovány těmito základními parametry – koercitivitou  $H_c$ , remanencí  $B_r$ , maximálním součinem  $(BH)_{\max}$ , permeabilitou  $\mu$  a Curieovou teplotou  $T_c$  či maximální pracovní teplotou  $T_w$ .

##### Koercitivita $H_c$

Též zvaná také jako koercivita, je intenzita magnetického pole, která působí proti směru spontánní magnetizace po dosažení celkové magnetické indukce v materiálu  $B = 0$ . Parametr  $H_c$  zkrátka udává míru či schopnost materiálu odolávat demagnetizaci (vnějším magnetickým polem i vlastním demagnetizačním polem). Její jednotkou je  $(A \cdot m^{-1})$ .

Existují dva typy koercivity:

- „skutečná“ koercivita  $H_{cb}$ , při níž je celková indukce  $B$  v magnetu rovna nule.
- „vnitřní“ koercivita  $H_{cj}$ , při které je celková polarizace  $J$  v magnetu rovna nule (vektory polarizace individuálních magnetických domén se vzájemně ruší).

Rozdíl těchto koercivit je zjevný z Obr. 29, kde parametr  $B_r$  je pro oba typy křivek  $B = f(H)$ ,  $J = f(H)$  shodný, kdežto pro parametr  $H_c$  se rozlišují koercivity  $H_{cj}$  a  $H_{cb}$ . Závislost  $B = f(H)$  se častěji využívá v technické praxi. [1], [7]

Závislost  $J = f(H)$  slouží spíše v oblasti materiálového výzkumu, kde magnetická polarizace  $J$  udává rozdíl mezi magnetickou indukcí ve feromagnetické látce a ve vakuu ( $J = B - B_0 = B - \mu_0 \cdot H$ ). Polarizace tvoří také ekvivalent k magnetizaci  $M$  ( $J = \mu_0 \cdot M$ ). [16], [17]

##### Remanence $B_r$

Hodnota magnetické indukce, která se ustálí po zmagnetování v uzavřeném magnetickém obvodu magnetu bez působení vnějšího magnetického pole. Jinak řečeno zbytková magnetizace poté, co bylo magnetizující pole odstraněno. Koresponduje s poměrem doménových momentů, které zůstaly orientované v jednom směru. Jednotka magnetické indukce je (T). [1], [7]

**Maximální součin  $(BH)_{\max}$** 

Též maximální energetický součin, jehož bod na demagnetizační křivce odpovídá poloze optimálního pracovního bodu P permanentního magnetu. Jestliže permanentní magnet pracuje v tomto bodě, poskytuje největší výkon na jednotku objemu. Je též úměrný magnetické energii uložené v magnetu optimálního tvaru. Parametr  $(BH)_{\max}$  odpovídá interakční síle magnetu vůči jiným feromagnetickým předmětům (nejčastěji železu). Jednotka tohoto součinu se udává v  $(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$ . [1], [7], [17]

**Permeabilita  $\mu$** 

Statistická veličina vyjadřující schopnost látky reagovat na vnější magnetické pole a zesilovat je. Tímto jediným číslem se nahrazuje působení velkého množství elementárních vázaných proudových smyček v magnetiku. Permeabilita vakua je rovna  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ , s permitivitou je ve vakuu vázána vztahem  $c = (\mu_0 \cdot \epsilon_0)^{-1/2}$ . Relativní permeabilita  $\mu_r$  charakterizuje, kolikrát větší (či menší) je permeabilita daného prostředí než permeabilita vakua  $\mu_0$ . Součin  $\mu_0 \cdot \mu_r$  se nazývá permeabilitou prostředí  $\mu$ , jejíž průběh se může určit dle magnetizační křivky z rovnice: [1], [8], [9]

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = \frac{B}{H} \quad (\text{H} \cdot \text{m}^{-1}; \text{T}, \text{A} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (34)$$

**Curieova teplota  $T_c$** 

Přechodová teplota, nad kterou feromagnetické nebo ferimagnetické materiály ztrácí spontánní magnetizaci a stávají se paramagnetickými. Při teplotách pohybujících se pod Curieovou teplotou, např. pro Fe ( $T_c = 1043 \text{ K}$ ), Co ( $T_c = 1404 \text{ K}$ ), Ni ( $T_c = 636 \text{ K}$ ), se v reálných magnetikách vyskytují právě již zmíněné uspořádané magnetické struktury. [8], [16]

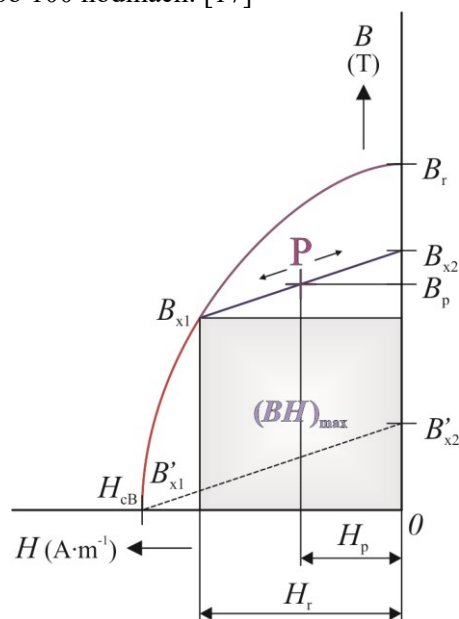
**Maximální pracovní teplota  $T_w$** 

Nejvyšší hodnota teploty, při které zůstává závislost  $B = f(H)$  lineární z bodu  $B_r$  do bodu  $B/B_0 = 1$ , v kterém již nevznikají další nevratné ztráty po 100 hodinách. [17]

**3.2.2. Demagnetizační křivka**

Jde o tu část hysterezní křivky, která se nachází mezi koncovými body  $B_r$  a  $H_{cB}$  ve II. kvadrantu hysterezní smyčky, podle níž je možné určit podstatné magnetické parametry permanentního magnetu. [1]

Jestliže na již zmagnetizovaný magneticky tvrdý materiál (permanentní magnet) o určité remanentní indukci  $B_r$  začne působit magnetické pole, které má za následek odagnetování (demagnetizaci) permanentního magnetu, zmenšuje se hodnota magnetické indukce právě podle demagnetizační křivky, viz Obr. 30. Při dosažení intenzity magnetického pole  $H_r$ , odpovídá hodnota magnetické indukce velikosti  $B_{x1}$ . [1]



Obr. 30. Pracovní část hysterezní smyčky magneticky tvrdého materiálu [1], [17]

Po snížení působení demagnetizačního pole bude magnetický stav materiálu charakterizován pracovním bodem P, který se může pohybovat po přímce  $B_{x1} - B_{x2}$ , která nahrazuje tzv. malou hysterezní smyčku.

Pokud zanikne demagnetizační pole, působí v permanentním magnetu magnetická indukce  $B_{x2} < B_r$ . Pokud se demagnetizační pole zvýší nad hodnotu  $H_r$ , pohybuje se pracovní bod dále po demagnetizační křivce pod bodem  $B_{x1}$ . Zmenší-li se poté opět působení demagnetizačního pole, pohybuje se pracovní bod P po nové malé hysterezní smyčce  $B'_{x1} - B'_{x2}$ . Přesná poloha pracovního bodu P závisí na tzv. demagnetizačním faktoru  $K_d$  daného magnetického obvodu. Každý magnet je podroben působením vnitřního demagnetizačního pole  $H_d$ , jehož vznik souvisí se snižováním jeho vnitřní energie, je dán vztahem:

$$H_d = -K_d \cdot M \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (35)$$

V optimálním případě se pracovní bod P shoduje v tomto případě s bodem  $B_{x1}$  (bod daný hodnotou magnetické indukce náležející maximálnímu energetickému součinu). [1], [7]

Dle typu hysterezní smyčky se mohou magnetické materiály rozdělit do těchto 3 typických skupin:

- Magneticky měkké materiály
- Magneticky tvrdé materiály
- Magnetické materiály pro speciální účely

### 3.3. Magneticky měkké materiály

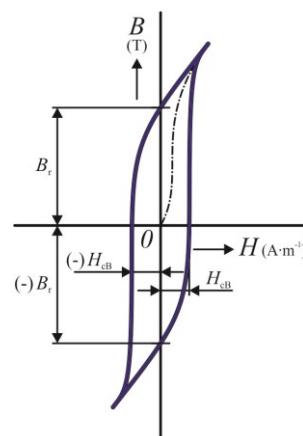
V této skupině se nachází magnetické materiály, které se vyznačují úzkým tvarem hysterezní smyčky s malou plochou (Obr. 31), dále malou koercitivní silou  $H_c$ , velkou maximální permeabilitou a snadnou magnetizací či demagnetizací.

Výroba magneticky měkkých materiálů je technicky náročná. Využívají se zejména ve střídavých magnetických polích, jako například v magnetických obvodech transformátorů a rotačních strojů, z důvodu vzniku malých hysterezních ztrát a ztrát způsobených vířivými proudy. [7], [10]

Magnetické vlastnosti feromagnetických materiálů závisí mimo chemických a strukturních změn (vlivem slitinových přísad) na mechanickém tváření a tepelném zpracování. Tím se rozumí takové zpracování kovů a slitin, jímž se dosahuje trvalých změn tvaru. Jde o válcování, lisování, tažení a kování buď za tepla, nebo zastudena.

Tepelným zpracováním se rozumí takové zpracování kovů a slitin, při němž se materiál ohřeje na určitou teplotu a pak se s určitou rychlostí ochlazuje. Na výši teploty a na rychlosti ochlazení poté závisí struktura a vlastnosti materiálu. Tepelné zpracování se provádí metodou žíhání, kalení, nebo popouštění vzhledem k zpracovávanému typu materiálu.

Tvářením zastudena nastávají značné změny magnetických vlastností, zmenšení permeability a zvětšení koercitivní síly a hysterezních ztrát. [10]



Obr. 31. Charakteristická hysterezní smyčka pro magneticky měkké materiály [7]

### 3.3.1. Fe „Armco“

Vysoce čisté železo, s obsahem méně než 0,05 % nečistot, určené pro použití ve stejnosměrných magnetických polích (materiál vykazuje malý měrný odpor). Ve střídavém poli by v něm vznikaly značné ztráty vlivem vířivých proudů. Takto čisté železo se běžně získává elektrolyticky, nejčistší železo za pomoci dlouhodobého žíhání ve vodíkové atmosféře. Užívá se velmi zřídka a bývá nahrazován slabě slitinovými druhy železa.

### 3.3.2. Křemíková ocel

Patří k nejrozšířenějším magnetickým materiálům používaných v elektrotechnice. Jde o ocel s příměsí 0,8 – 4,5 % křemíku, který má za následek zvýšení hodnot permeability, měrného odporu (6 krát vyšší než u čistého železa), což snižuje hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy. Nepříznivě se křemík projevuje snížením hodnot koercitivity, magnetické indukce (sycení) železa a zhoršením mechanických vlastností (ocel se vyznačuje značnou tvrdostí, křehkostí a je hůře razitelná).

Tato ocel se používá pro jádra nízkofrekvenčních tlumivek, jádra sdělovacích transformátorů a ve stavbě točivých strojů, kde dochází k cyklickým magnetizačním pochodům. Pro výrobu transformátorových plechů se užívá slitiny s obsahem 3,2 – 4,2 % Si při tloušťce plechu 0,35 – 0,5 mm. U transformátorů složených s těchto plechů dosahují hodnoty tzv. ztrátového čísla  $z_{10} \approx 1,3 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Pro výrobu dynamových plechů se užívá ocelí s obsahem 0,5 – 3,2 % Si při tloušťce plechu 0,5 mm, které se používají pro obvody motorů, generátorů, tlumivek, průmyslových transformátorů a jiných přístrojů na průmyslový kmitočet. Dynamové plechy dosahují hodnot ztrátového čísla  $z_{10} \approx 1,7 – 3,6 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ . [7], [10], [11]

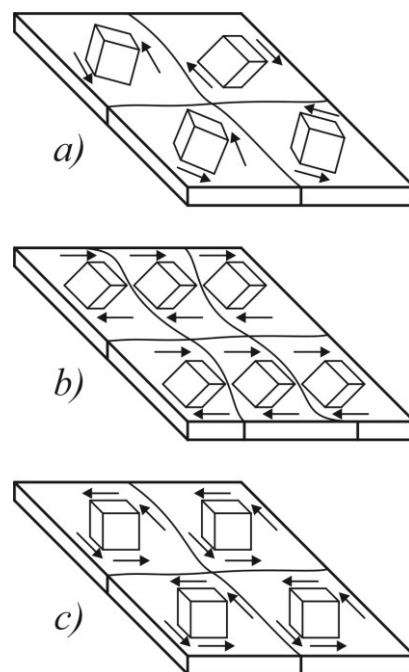
Existují 3 druhy elektrotechnických křemíkových ocelových plechů:

- 1) *Izotropní válcované za tepla (Et)*
- 2) *Izotropní válcované za studena (Ei)*
- 3) *Anizotropní válcované za studena (Eo)*

**Ad. 1)** Jedná se o plechy, ve kterých magnetické vlastnosti působí ve všech směrech stejně (neorientované). Uspořádání krystalů v tomto plechu odpovídá Obr. 32 a).

**Ad. 2)** Tyto plechy postupně nahradily předchozí válcované plechy za tepla. Jsou taktéž neorientované, mají lepší kvalitu povrchu, malou toleranci tloušťky plechu, velký součinitel plnění a velmi dobrou zpracovatelnost.

**Ad. 3)** Jde o plechy, jejichž magnetické vlastnosti působí pouze určitým směrem. Mají orientovanou skrusturu krystalů dle Obr. 32 b), c). Existují 2 typy orientované struktury – Gossova a kubická. V Gossově struktuře jsou hrany krystalů rovnoběžné se směrem válcování plechu, a orientace působení magnetických vlastností je s tímto směrem shodná. Kubická struktura vykazuje dobré magnetické vlastnosti i v příčném směru k válcování plechů. [12]



Obr. 32. Vyobrazení možných orientací krystalů v křemíkové oceli [12]

- a) *Izotropní*
- b) *Anizotropní – Gossova struktura*
- c) *Anizotropní – kubická struktura*



### 3.3.3. Slitina Ni-Fe „PERMALLOY“

Vyznačuje se velmi dobrými magnetickými vlastnostmi, především vedle čistého Fe jde o magneticky nejměkčí materiál. Jde o slitiny Fe s vysokým obsahem niklu (35 – 80 %). V porovnání s křemíkovou ocelí má tato slitina abnormálně vysokou permeabilitu, nízkou koercitivitu (k nasycení dochází již při slabém působení magnetického pole), nízké hysterezní ztráty a oproti čistému Fe dvojnásobnou rezistivitu. Tloušťka tohoto slitinového plechu dosahuje až 0,03 mm. Pro účely v silnoproudé elektrotechnice nemají velký význam z důvodu vysoké ceny použitých slitinových prvků. Využívá se tedy ve slaboproudé elektrotechnice, jakožto ve sdělovací technice v oblasti vysokých frekvencí, v jádrech transformátorů, tlumivkách a stínících krytech k magnetickému odstínění. Bylo vyvinuto kolem 20 druhů permalloyů, např. Mumetal, Radio-metal, Hipernik, Megaperm, Permenorm, Supermalloy aj. [7], [10], [12]

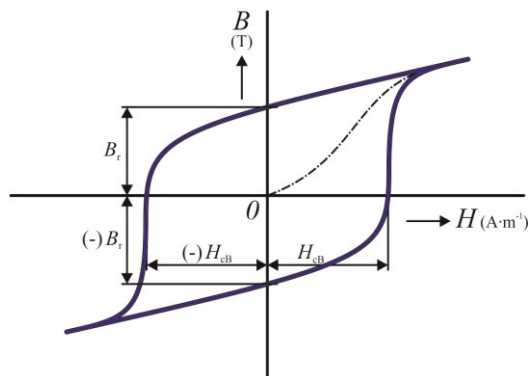
### 3.3.4. Amorfní kovy – magnetická kovová skla

Jde o perspektivní skupinu materiálů, které nemají krystalickou strukturu jako běžné kovy, avšak mají stejný vzhled. Vyrábí se metodou rychlého ochlazení taveniny, při kterém se zabráni krystalizaci a po jejím odlití se provede žhání. Hlavní složkou těchto materiálů je některý feromagnetický prvek (Fe, Ni, Co) společně s přídavnými prvky zpomalující krystalizaci (B, Si, C). Vykazují malé ztráty při přemagnetování a jejich tvrdost a pevnost odpovídá legovaným ocelím. Oproti elektrotechnické oceli vykazují pětikrát větší rezistivitu. Vyrábí se z nich dlouhé pásy s tloušťkou zpravidla 0,03 mm. Mohou být využity např. ke konstrukci jader transformátorů (MTP), k výrobě vysoce kvalitních a levných magnetických snímacích hlav pro magnetofony, miniaturní mikrofony, magnetické zesilovače nebo jako magnetické stínění. [7], [12]

## 3.4. Magneticky tvrdé materiály

V této skupině se nachází magnetické materiály, které se naopak vyznačují širokým tvarem typu hysterezní smyčky, tedy vysokou hodnotou koercitivity, velkou remanencí, obtížným zmagnetováním a demagnetizací daného materiálu.

Využívají se ve strojích a zařízeních k vytváření stejnosměrných magnetických polí – výroba permanentních magnetů. [7], [10]



Obr. 33. Charakteristická hysterezní smyčka pro magneticky tvrdé materiály [7]

Při technologickém zpracování materiálů magneticky tvrdých se postupuje opačně než při výrobě magneticky měkkých. Za pomoci tepelného a mechanického zpracování se v materiálu vytváří velká vnitřní pnutí, čímž se rozšiřuje hysterezní smyčka a navyšuje koercitivní síla.

Nejstarší a nejjednodušší permanentní magnety jsou vyrobeny z kalené uhlíkové oceli vykazující velkou mechanickou a magnetickou tvrdost. Nejvyšší obsah uhlíku je přibližně 1 %, jímž se zvyšuje koercitivita, ale zmenšuje remanence. Zakalená uhlíková ocel je velmi nestabilní a vlivem mechanického zpracování mění snadno své magnetické vlastnosti. Jakostnější a magneticky stabilnější oproti uhlíkovým ocelím jsou magnety z wolframových, chrómových a kobaltových ocelí. Tyto oceli se lijí do ingotu a za tepla se válcují do tyčí a pásků. [10]



Jinou skupinou slitin pro výrobu permanentních magnetů jsou slitiny schopné vytvrzování (slitiny s Fe, Ni, Al, Co, Cu), u nichž nastává po zakalení vylučování jedné ze součástí slitiny. Vytvrzovaná slitina je po zakalení magneticky měkká a teprve po ohřátí na určitou teplotu začíná vylučovací fáze, již se dosáhne magnetické tvrdosti materiálu (např. *AlNiCo*). [10]

Dalšími skupinami materiálových typů pro výrobu permanentních magnetů jsou magneticky tvrdé ferity a magnety ze vzácných zemin, které jsou v současnosti nejvíce užívanými magnety.

#### 3.4.1. *Ferity*

Též nazývané jako magnetické oxidické materiály, jsou sintrované permanentní magnety – tepelné opracování při vysokých teplotách, kdy jsou výlisky z prášku či suspenze zhušťovány a homogenizovány (u tvrdých feritů 1200°C, u magnetů ze vzácných zemin 1050 – 1200°C). Charakter složení feritů je blízký keramice. Kategoricky spadají jak do magneticky tvrdých materiálu, tak také i do magneticky měkkých materiálů. Ferity jsou typickým představitelem ferimagnetických materiálů a nejlevnějšími z běžně dostupných permanentních magnetů. [7], [16]



Obr. 34. Různé výrobní formy tvrdých feritů [18]

Obecně se ferity vyznačují velkou hodnotou rezistivity, nízkými ztrátami elektromagnetické energie vlivem indukovaných vířivých proudů a vlastní dokonalou homogenností materiálu. Jedním z typů feritů jsou magneticky tvrdé (hexagonální) ferity, které se používají pro trvalé magnety v konstrukcích stejnosměrných a asynchronních elektromotorků pro rotory a statory; dále v radioelektronice a v zařízeních, kde jsou požadovány vysoké frekvence, anebo jako prosté kancelářské magnety. Dosahují nízké hodnoty magnetické remanence přibližně  $B_r \approx 0,2 \text{ T}$  při koercitivitě  $H_c \approx 200 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ . Relativní permeabilita se pohybuje v rozmezí  $\mu_r = 10 - 4000$ . [7], [8]

Vyrábí se z oxidu železa, nejčastěji z karbonátu baria nebo stroncia ( $\text{BaFeO}_4$ ,  $\text{Sr}(\text{FeO}_2)_2$ ) v různých formách, jako disky, bloky a toroidy o malé výšce a velké ploše. Jsou tvrdé, křehké, choulostivé na rozbití, odolné vůči vlivům počasí, většině chemikálií, rozpouštědům a neoxidují. Jsou dosti závislé na teplotě a téměř nevodivé. Nejsou citlivé na demagnetizaci a za normálních podmínek si udržují permanentní magnetizmus. Z hospodářského hlediska jsou velmi výhodné, jelikož u nich není zapotřebí příměsí jako Al, Ni, ani Co. [8], [10], [17], [18]

#### 3.4.2. *AlNiCo*

Slitina složená z Al (6 – 12 %), Ni (14 – 28 %), Co (0 – 35 %) a zbytku Fe, případně může obsahovat i další příměsí (Ti). Tyto permanentní magnety se vyznačují vysokou hodnotou Curieovy teploty (až 550°C) a magnetické remanence ( $B_r \approx 1,2 \text{ T}$ ), a to při nízké hodnotě koercitivity ( $H_c \approx 56 - 80 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ ). [7], [10], [16], [18]



Obr. 35. Různé výrobní formy AlNiCo [27]

Vyrábí se sintrováním nebo litím ve formách disků, bloků, tyčí, toroidů, podkov a jsou rozměrově situovány na větší výšky o menší ploše. Oproti feritům nejsou v takové míře náchylné na rozbití. [18]

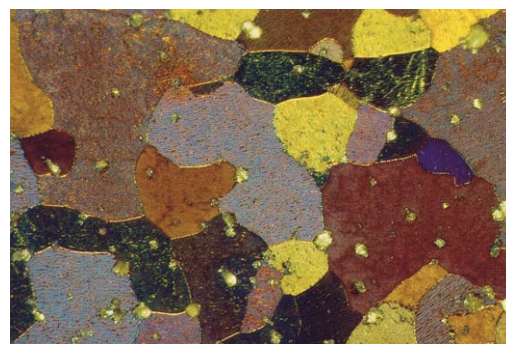
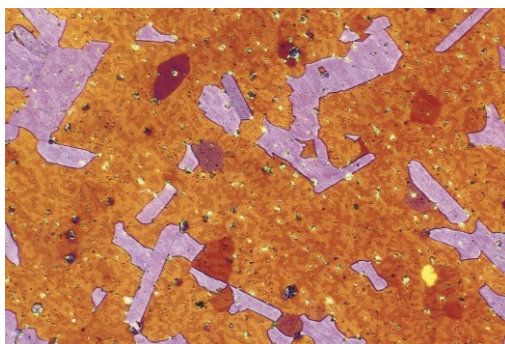
### 3.4.3. *SmCo*

Existují dva komerční materiály, v poměru elementů 1:5 ( $SmCo_5$ ) a 2:17 ( $Sm_2Co_{17}$ ). Jde o materiály charakterizované nejvyššími hodnotami vnitřních koercivit  $H_{cj}$ , mechanickou křehkostí, tvrdostí a celkovými malými rozměry. Jsou druhými nejsilnějšími permanentními magnety po neodymech ( $NdFeB$ ). [16]



Obr. 36. Různé výrobní formy *SmCo* [28]

Vyrábí se práškovou technologií ve formách bloků, disků, toroidů a různých jiných. Mají přirozenou odolnost vůči korozi, tedy bez nutnosti povrchové úpravy oproti neodymům. Jejich nevýhodou je vysoká cena způsobená velkým zastoupením kobaltu a špatná odolnost vůči anorganickým kyselinám a rozpouštědlům. [18], [19]



Obr. 37. Struktury *SmCo* magnetů zvětšené 1000x [16]

Struktura  $SmCo_5$  (Obr. 37, vlevo) je převážně tvořená magneticky tvrdou fází  $SmCo_5$  (hnědá barva) a místy  $Sm_2Co_7$  (fialová barva). Ve struktuře  $Sm_2Co_{17}$  (Obr. 37, vpravo) jsou obsaženy kromě tohoto poměru (různé barvy vznikající při leptání) jemné zrnité mezní fáze jiného složení (světlá barva) a karbidy Zr (největší částice).

Permanentní magnety na bázi  $SmCo_5$  a  $Sm_2Co_{17}$  byly začátkem 80. let zásadně doplněny vývojem magnetů na bázi  $NdFeB$ , které jsou svým složením a cenou výhodnější, avšak  $SmCo$  disponují vyšší hodnotou Curieovy teploty a mají tím nižší teplotní koeficienty  $H_{cj}$  a  $B_r$ . [16]

### 3.4.4. *NdFeB*

Magnetický materiál s nejvyšším energetickým součinem  $(B \cdot H)_{max}$ . Základní složení elementů je v poměru 2:14:1. Další elementy se mohou přidávat pro vylepšení vlastností, hlavně dysprosium (Dy) pro zvýšení hodnoty koercitivity a kobalt (Co) pro navýšení Curieova bodu. Neodymové magnety jsou tvrdé, křehké a citlivé na rozbití. [16], [17]



Obr. 38. Diskový  $NdFeB$  [29]

Vyrábí se ve formách bloků, disků, toroidů, segmentů a různých jiných. Jejich nevýhodou je velká náchylnost ke korozi a při výrobě se tedy galvanizují. Nejčastěji je povrchová úprava realizována zinkem, niklem, dále například pozlacením, epoxidací, anebo nejnověji hliníkem či nitridem titanu. [18], [19]

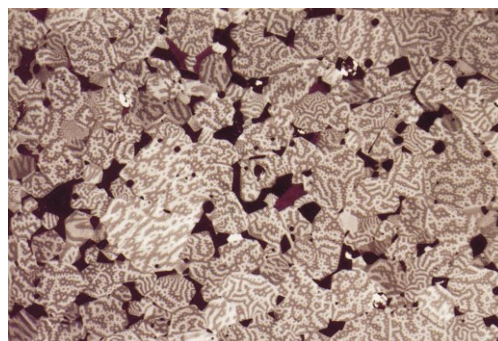
Struktura  $NdFeB$  je tvořena převážně doménovou strukturou magneticky tvrdé fáze  $Nd_2Fe_{14}B$  a zrnitými fázemi z prakticky čistého neodymu (černá barva). V současnosti jsou neodymy nejsilnějšími permanentními magnety.

$SmCo$  a  $NdFeB$  patří do skupiny magnetů ze vzácných zemin. Ve srovnání s tradičními permanentními magnety jsou podstatně výkonnější a jsou založeny především na intermetalických sloučeninách z kovů ze vzácných zemin (např. samarium, neodym) a přechodových kovů (TM), např. kobalt, železo.

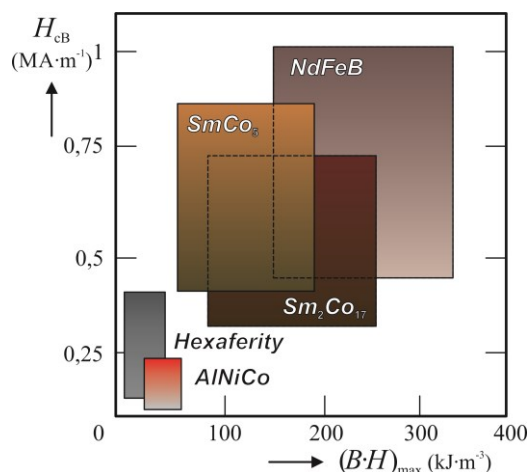
Mají významně vyšší hodnoty koercitivity  $H_{cJ}$  nebo remanence  $B_r$  nežli známé a osvědčené trvalé magnety, jakými jsou oceli,  $AlNiCo$  a ferity. [16]

Tyto magnety umožňují značnou miniaturizaci rozměrů, protože dosáhnou stejné přídržné síly při mnohem menších rozměrech než např. feritové magnety. Širšímu uplatnění brání zejména vysoká cena surovin a náročnost technologického zpracování.

Využívají se v aplikacích, kde je potřeba vyvinout silnou magnetickou interakci (přídržnou sílu) nebo tam, kde záleží na malých rozměrech. Jsou to např. rotory a statory motorů, lineární motory, magnetické spojky a brzdy, magnetické polarizátory tekutin, magnetické separátory nebo zabezpečovací systémy. [7]



Obr. 39. Struktura  $NdFeB$  magnetu zvětšená 1000x [16]



Obr. 40. Porovnání permanentních magnetů z hlediska  $H_{cB}$  a  $(BH)_{max}$  [7]

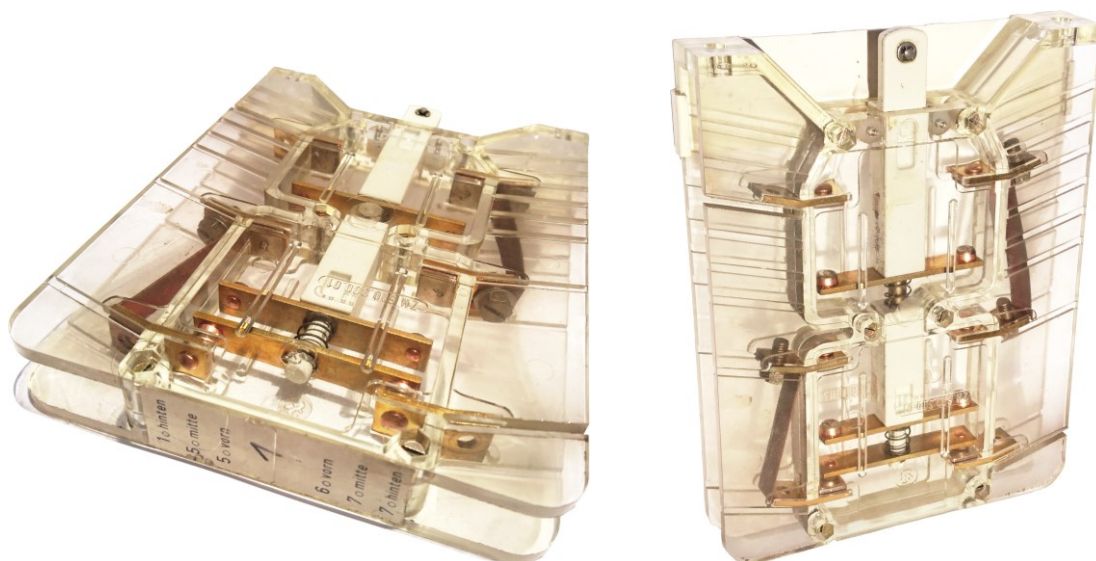
Tab. 1. Klasifikace vlastností permanentních magnetů [17]

Vlastnosti	Ferity	AlNiCo	SmCo	NdFeB
	(1 vysoká - 4 nízká)			
Energie	4	3	2	1
Pracovní teplota	3	1	2	4
Odolnost vůči korozi	1	2	3	4
Odolnost vůči demagnetizaci	3	4	1	2
Mechanická pevnost	4	1	3	2
Teplotní koeficient	1	4	3	2
Cena	4	3	1	2



#### 4. NÁVRH POHONU URČENÉHO PRO OVLÁDÁNÍ SPÍNÁNÍ KONTAKTNÍHO SYSTÉMU

Kontaktní systém, pro který bylo navrženo několik konstrukcí pohonu, je vyobrazen na *Obr. 41*:



*Obr. 41. Fotografie kontaktního systému*

Tento kontaktní systém slouží pro spínání a rozpínání kontaktů pracující s napětovou hladinou do  $U = 1$  kV. Vyskytuje se ve standardních drážních vagoněch vlaků k zajištění funkce různých funkčních obvodů v daném vagonu, jakož to obvody pro napájení a ovládání například světelných obvodů, obvodů pro vytápění a dalších potřebných pomocných zařízení.

Príslušný kontaktní systém pracuje na principu tzv. *stykače se suvným provedením*. Je tvořen 2 páry připojovacích svorek (4 samostatné svorky + 2 svorky vodivě spojené měděnými pásky), které jsou spínány či rozpínány 3 mechanicky spřaženými kontaktními můstky (s dvojnásobným přerušením v každém pólu). Můstky jsou pomocí táhla spojeny přes izolační mezičlen pevně s kotvou elektromagnetu, který uvádí tyto můstky do pohybu. Proti tomuto pohybu mechanismu působí třecí odpory a síly napínaných kontaktních pružin (působící přibližně v poslední třetině tahu kotvy). [2], [3]

Konkrétněji jeden kontaktní můstek slouží k rozpínání 2 svorek a zbylé dva kontaktní můstky slouží k spínání dalších 4 svorek (2 samostatné svorky + 2 svorky vodivě spojené). Samotná tělesa připojovacích svorek a tělesa pohyblivých kontaktních můstků jsou vyrobeny z mosazného tažného profilu. Jako materiál pro kontakty přístroje je použita měď s galvanicky nanesenou vrstvou stříbra (postříbřená měď). Kontaktní styková plocha je bodového typu ( $n = 0,5$ ). Kryt kontaktního systému je tvořen čirou plastickou hmotou a pohyblivé táhlo (pevně spojené s tělesem kotvy elektromagnetu) z bílé plastické hmoty.

Tento typ kontaktního systému je však přístroj určený pouze ke spínání a rozpínání kontaktů, a to v beznapětovém stavu. Jeho konstrukce není uzpůsobena k zhášení elektrického oblouku mezi kontakty – z tohoto pohledu se tedy prakticky jedná o kontaktní systém s funkcí prostého odpojovače. Jištění obvodu, proti případnému zkratu v síti, je opatřeno jiným typem elektrického přístroje primárně určeným pro funkci zhášení elektrického oblouku.

#### 4.1. Konstrukční omezení pohonu

Jednou z podmínek pro návrh pohonu kontaktního systému je požadavek beznapětového stavu pohonu při sepnutých či rozepnutých kontaktech. Další podmínkou při návrhu konstrukce pohonu je požadavek dodržení vlastních rozměrů ovládaného kontaktního systému, které nesmí být překročeny. Rozměry elektrického přístroje, které jsou zároveň limitní z hlediska návrhu konstrukce pohonu, jsou uvedeny v *Tab. 2* a *Tab. 3*:

*Tab. 2. Naměřené rozměry krytu a kotvy*

Rozměry	výška	šířka	délka
	(mm)		
Kryt	124,15	22,2	160,31
Kotva	13,85	11,75	<i>Tab. 3.</i>

*Tab. 3. Velikost dráhy kotvy*

Rozmezí	při odtahu	při přitahu	střední hodnota
	(mm)		
Krajní polohy	0	35,5	17,75
Volně	7	28,5	

Uvedené rozměry v *Tab. 2* a v *Tab. 3* byly naměřeny za pomoci normovaného posuvného měřítka (ČSN 25 1238 a ČSN 99 0656).

Jako další podmínkou je požadavek na rychlost spínání kontaktního systému a na sílu kladenou na kontakt, které by měly být pokud možno co největší s ohledem na optimální kontaktní styk (tedy bez vzniku elektrického oblouku způsobeného případným odskokem kontaktů). Poslední podmínkou, která byla brána v úvahu při návrhu, je složitost konstrukce pohonu z hlediska technologie výroby, jeho provozu a z ekonomického hlediska.

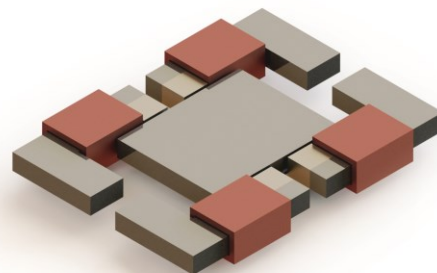
Na základě stanovených omezení byl vybrán pro realizaci pohonu polarizovaný elektromagnet, který výše uvedené podmínky dokáže splnit. Požadavek na stabilní polohu kontaktního systému mimo dobu provozu daného zařízení (tedy ve vypnutém stavu) nebyl nijak stanoven.

#### 4.2. Návrhy vlastních konstrukčních uspořádání elektromagnetu

Bylo celkem navrženo 9 konstrukcí, které vychází ze tří základních magnetických obvodů, a to ze sériového, paralelního a můstkového. Přitah kotvy bude realizován přivedením energetického výboje z příslušného kondenzátoru (který je součástí řídicí elektroniky) o stanovených parametrech do patřičně zapojených vinutí, viz dále. Návrhy a následná modelace konstrukcí byla provedena v příslušném CAD softwaru „SolidWorks 2014“.

##### 4.2.1. Konstrukce 1

První typ je složen ze dvou sériových magnetických obvodů s jednou společnou kotvou. Každý z obou magnetických obvodů se nachází v jedné polovině elektromagnetu. Na magnetických obvodech jsou navinuta vinutí, kde na jeden z těchto magnetických obvodů připadají 2 vinutí, která jsou zapojena vůči sobě souhlasně; v celé konstrukci jsou celkem 4 vinutí. V počátečním stavu se kotva již bude nacházet v jedné z krajních koncových poloh, kde je kotva přidržována za pomoci permanentních magnetů umístěnými uprostřed konstrukce.



*Obr. 42. Vyobrazení modelu konstrukce 1*

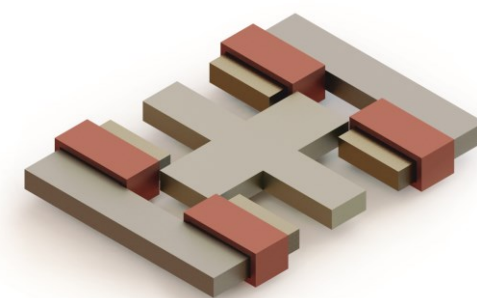
Vinutí elektromagnetu jsou zapojena tak, že při přivedení impulzu k přepolarizování elektromagnetu má jeden z magnetických obvodů tendenci přitahovat kotvu do protilehlé krajní koncové polohy „k sobě“ a druhý magnetický obvod má opačnou tendenci – odtažuje kotvu „od sebe“, což má za následek postupný posuv kotvy do druhé krajní koncové polohy.

Nevýhody konstrukce 1 jsou velké rozměry vlastní kotvy a tím i hmotnosti, společná cesta obou magnetických toků, které mají za následek mírnou demagnetizaci permanentních magnetů (v závislosti na použitém typu materiálu magnetu) a uzavírání části polarizačního toku mimo samotnou kotvu.

#### 4.2.2. Konstrukce 2

Druhý typ pracuje na stejném principu, kde pracují dva sériové magnetické obvody s jednou společnou kotvou. Tato konstrukce se liší ve tvaru kotvy a v umístění permanentních magnetů. Jak je vidět na Obr. 43 vpravo, kotva je ve tvaru kříže v celé šířce elektromagnetu. Permanentní magnety jsou umístěné na koncích magnetických obvodů.

Tato provedená úprava zlepšuje sílu přitahu díky lepšímu umístění permanentních magnetů, které mají větší objemovou velikost a jejichž polarizační tok se celý uzavírá přes samotnou kotvu.



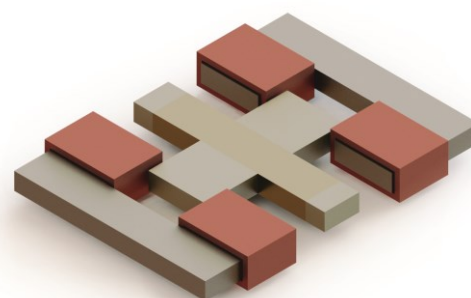
Obr. 43. Vyobrazení modelu konstrukce 2

Nevýhodou této konstrukce je stále velká velikost kotvy a společná cesta řídicího a polarizačního toku.

#### 4.2.3. Konstrukce 3

Jako třetí typ pracuje na téže principu, kde pracují dva sériové magnetické obvody, avšak byl mírně upraven podle paralelního magnetického obvodu – permanentní magnet se nachází vně kotvy.

Výhodou takové konstrukce je nižší počet použitých permanentních magnetů ze čtyř na jeden kus o větší objemové velikosti a plynulejší průběh přitahu kotvy – na kotvu působí o něco dříve síla přitahu druhého magnetického obvodu oproti konstrukcím 1 a 2.



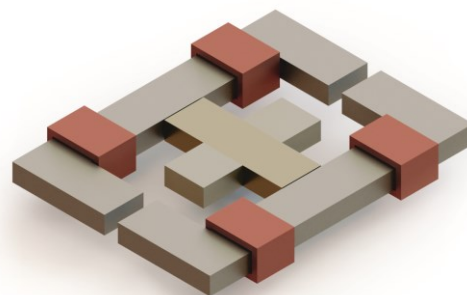
Obr. 44. Vyobrazení modelu konstrukce 3

Nevýhodou konstrukce je však včetně předchozích nevýhod i menší síla přitahu kotvy oproti dvěma předchozím konstrukcím.

#### 4.2.4. Konstrukce 4

Čtvrtý typ konstrukce pracuje s ryze paralelním magnetickým obvodem. Magnetický obvod je společný pro všechna 4 vinutí, která jsou vzájemně propojena a se souhlasnou polaritou.

Výhodou této konstrukce jsou menší rozměry kotvy a lepší rozdělení cest magnetických toků (řídící tok neprochází přímo přes těleso permanentního magnetu). Tato konstrukce vykazuje podobnou velikost síly přitahu jako u předchozích konstrukcí 1 a 2. Nevýhodou je stále částečná společná cesta řídícího a polarizačního magnetického toku přes těleso permanentního magnetu.

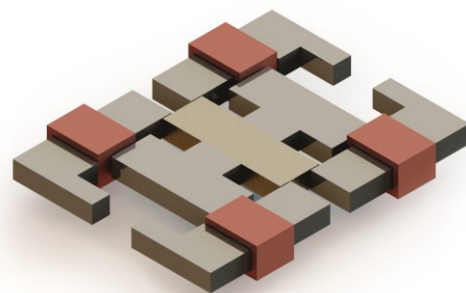


Obr. 45. Vyobrazení modelu konstrukce 4

#### 4.2.5. Konstrukce 5

Další typ konstrukce vychází taktéž z paralelního magnetického obvodu. Od konstrukce 4 se liší pouze tvarem kotvy a přerušeným magnetickým obvodem.

Tato úprava má za následek zlepšení cesty magnetického toku při přepolarizování elektromagnetu – řídící tok se částečně uzavírá přes původní dráhu jako u konstrukce 4, avšak menší mírou, z důvodu vytvořené vzduchové mezery (magnetického odporu), a také se řídící tok uzavírá částečně přes kotvu. Při polarizování elektromagnetu vykazuje síla přitahu kotvy vyšších hodnot než u předchozích konstrukcí. Nevýhodou konstrukce je složitější tvar kotvy.

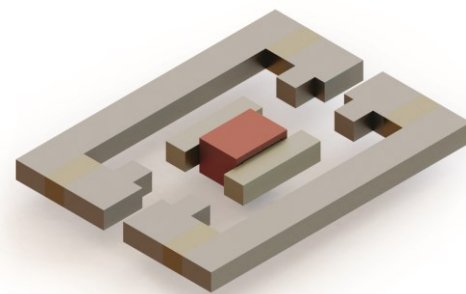


Obr. 46. Vyobrazení modelu konstrukce 5

#### 4.2.6. Konstrukce 6

Jde o typ konstrukce s ryze můstkovým magnetickým obvodem. Elektromagnet je složen ze 4 permanentních magnetů tvořící stálý polarizační tok v magnetickém obvodu a jednoho vinutí navinuté přímo na těleso pohybující se kotvy.

Jeho předností a zároveň výhodou je téměř oddělená dráha řídícího a polarizačního magnetického tok. Řídící tok vůbec neprochází skrze tělesa permanentních magnetů a nedochází tedy k jejich demagnetizaci.



Obr. 47. Vyobrazení modelu konstrukce 6

Nevýhodou konstrukce je však ono vinutí na tělese kotvy. Při přepolarizování elektromagnetu, kdy kotva koná posuv z jedné krajní polohy do druhé, dojde k této změně relativně rychle v rámci několika desítek ms.

Z technologického hlediska by bylo velice obtížné vyrobit kotvu elektromagnetu tak, aby se na ni při tako rychlých změnách jednak udrželo samotné vinutí a jednak zajistilo vhodného přívodu pro energetický řídicí impuls. Jde zkrátka o teoretickou funkci navržené konstrukce, která by však reálně vydržela jen pár cyklů přepolarizování elektromagnetu.

#### 4.2.7. Konstrukce 7

Tento typ konstrukce je kombinací v podstatě čtyř sériových magnetických obvodů s podobnou kotvou, jako tomu je u konstrukce 6 s můstkovým magnetickým obvodem. Magnetické obvody jsou složeny opět ze 4 permanentních magnetů s řídicím vinutím navinutým na kotvě elektromagnetu.

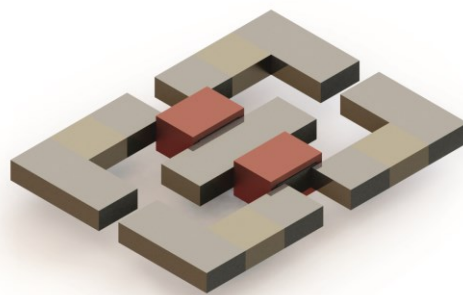
Obdobně jako u konstrukce 6 jde o teoretickou funkci konstrukce, kde je vinutí navinuto na těleso kotvy. Navíc u této úpravy prochází opět řídicí tok i přes tělesa permanentních magnetů, což do určité míry demagnetizuje tyto permanentní magnety.

Jedinou výhodou této úpravy konstrukce je lepší a plynulejší přitah kotvy.

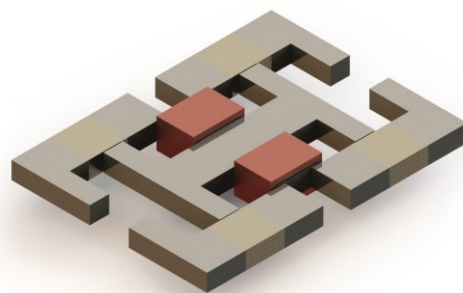
#### 4.2.8. Konstrukce 8

Předposlední typ konstrukce vychází z konstrukcí 5 a 7, kde magnetický obvod byl ponechán z předchozí konstrukce 7 a tvar kotvy elektromagnetu byl upraven podle konstrukce 5.

Nevýhody této úpravy jsou stále stejné jako u konstrukce 7. Další nevýhodou je složitější tvar kotvy, která však umožňuje lepší a zajímavý průběh přitažné síly, než tomu bylo u všech předchozích konstrukcí (při přepolarizování elektromagnetu působí na kotvu nejvyšší hodnoty silových působení uprostřed konstrukce, tedy mezi magnetickými obvody).



Obr. 48. Vyobrazení modelu konstrukce 7



Obr. 49. Vyobrazení modelu konstrukce 8

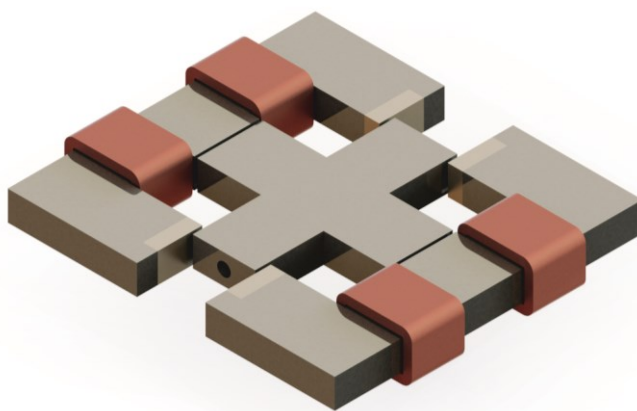


#### 4.2.9. Konstrukce 9

Poslední návrh typu konstrukce byl inspirován můstkovým magnetickým obvodem a konstrukcí 4, ze které byl převzat tvar kotvy.

Mezi hlavními přednostmi této konstrukce patří funkce můstkového magnetického obvodu, kde řídicí tok při samotném koncovém přitahu či počátečním odtahu kotvy neprochází skrze tělesa permanentních magnetů a nedochází tedy k jejich demagnetizaci. Při přepolarizování elektromagnetu však tento řídicí tok i nadále prochází skrze tyto permanentní magnety, u nichž ale dochází naopak k jejich dalšímu krátkodobému zmagetování, viz analýza. Příznivější jsou také samotné rozměry konstrukce elektromagnetu, jehož délka je oproti ostatním návrhům o polovinu menší.

Konstrukce je složena ze 4 permanentních magnetů umístěných na magnetickém obvodu (obdobně jako u konstrukce 1) a 4 řídicích vinutí navinutých na magnetický obvod, viz *Obr. 50*.



*Obr. 50. Vyobrazení modelu konstrukce 9*

Tento poslední návrh konstrukce v sobě zahrnuje výhodné vlastnosti konstrukcí 4 a 6, které zajišťují předpoklad správné požadované funkce elektromagnetu, s ohledem na složitost pozdější technologie výroby a ekonomický provoz. Z těchto důvodů byla konstrukce 9 vybrána pro další podrobnější analýzu fyzikálních vlastností a provozní funkce.

#### 4.3. Požadavky na korektnost kontaktního styku

Při navrhování pohonu kontaktního systému je zapotřebí dbát na technické požadavky příslušného kontaktního systému, aby nedocházelo během jeho provozu k nadbytečnému opotřebovávání kontaktů. Mezi tyto požadavky patří zejména přítlačná kontaktní síla daného kontaktu, dynamické silové účinky kladené na kontakt a oteplení v místě kontaktního styku vlivem průchodu proudu. K určení těchto veličin lze dojít za pomoci analytického výpočtu, který vychází z řešení náhlého zúžení průřezu proudovodné dráhy.

K výpočtu jsou zapotřebí vstupní parametry, zahrnující určité vlastnosti kontaktního materiálu, které se nachází v příslušných tabulkách. Pro výpočet je tedy zapotřebí znát hodnoty napětí a teploty měknutí mědi ( $U_m = 120 \text{ mV}$ ;  $\Theta_m = 473,15 \text{ K}$ ), hodnotu napětí svaření mědi ( $U_{sv} = 430 \text{ mV}$ ), materiálovou konstantu (součinitel) mědi ( $K_{Cu} = 0,002 \Omega$ ) a hodnotu tvrdosti mědi dle Brinella ( $H_B = 500 \text{ MPa}$ ). [2], [3]

Hodnota jmenovitého proudu, který protéká přes kontaktní systém, může dosahovat hodnoty  $I_n \approx 15$  A. Případný zkratový proud by mohl na základě velikosti průřezu proudovodné dráhy kontaktního systému dosahovat hodnoty přibližně  $I_k \approx 45$  A.

Kontaktní odpor je možno určit ze vztahů:

$$R_k = \frac{U_m}{2 \cdot I_n} \quad (\Omega; V, A) \quad (36)$$

$$R_k = \frac{U_{sv}}{2 \cdot I_k} \quad (\Omega; V, A) \quad (37)$$

kde po dosazení příslušných tabulkových hodnot:

$$R_k = \frac{120 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 15} = \underline{\underline{4 \text{ m}\Omega}}$$

$$R_k = \frac{430 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 45} \doteq 4,78 \text{ m}\Omega$$

Kontaktní síla se vypočte ze vztahu:

$$F_k = F^{-1} \cdot \left( \frac{K_{Cu}}{R_k} \right)^{n^{-1}} \quad (N; N, \Omega, \Omega, -) \quad (38)$$

kde  $F = 1$  N a za  $R_k$  se dosadí menší z vypočtených hodnot ze vztahů (36) a (37):

$$F_k = 1 \cdot \left( \frac{0,002}{4 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,5^{-1}} = 0,25 \text{ N}$$

Ze znalosti kontaktní síly je možné dále určit velikost průměru kontaktní úžiny:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot F_k}{\pi \cdot H_B}} \quad (m; N, Pa) \quad (39)$$

kde po dosazení:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,25}{\pi \cdot 500 \cdot 10^6}} \doteq 25,23 \mu m$$

Vztah pro výpočet síly, která je vyvolána průchodem zkratového proudu přes kontaktní úžinu: [3]

$$F_{uz} = 10^{-7} \cdot I_k^2 \cdot \ln \left( \frac{D_k}{d_u} \right) \quad (40)$$

a která působí proti kontaktní síle  $F_k$ , je po dosazení rovna:

$$F_{uz} = 10^{-7} \cdot 45^2 \cdot \ln \left( \frac{5 \cdot 10^{-3}}{25,23 \cdot 10^{-6}} \right) \doteq 1,071 \text{ mN}$$

Celková síla, která je kladená na kontakt, je pak dána rozdílem sil ze vztahů (38) a (40):

$$F_{ck} = F_k - F_{uz} = 0,25 - (1,071 \cdot 10^{-3}) \doteq 0,2489 \text{ N}$$

Vzhledem k velikosti oteplení kontaktu, které by při malé přitlačné síle působící na kontakt mělo za následek značné oteplení kontaktů (přibližně 790°C), je zapotřebí celkovou sílu  $F_{ck}$  navýšit. Maximální hodnota potřebné přídavné přitlačné síly byla určena na základě měření. Síla, kterou je zapotřebí vyvinout, byla pro každou polohu naměřena různě – konkrétně pro krajní polohu přitahu kotvy bylo zapotřebí vyvinout síly  $F = 9,81$  N, a pro druhou krajní polohu odtahu kotvy síly  $F = 15,69$  N. Průměrná hodnota přitlačné síly, která je dostačující pro přitlak kontaktu, je tedy přibližně rovna  $F_{kp} = 12,75$  N.

Celková síla kladená na kontakt, s přičtenou přídavnou přitlačnou silou, je poté rovna:

$$F_C = F_{ck} + F_{kp} = 0,2489 + 12,75 \doteq 13 \text{ N}$$

Pro výpočet oteplení kontaktu lze vyjít ze znalosti hodnoty úžinového odporu, který je dán vztahem:

$$2R_u = \frac{K_{Cu}}{\left(\frac{F_C}{F}\right)^n} \quad (\Omega; \Omega, N, N, -) \quad (41)$$

a po dosazení je roven:

$$R_u = \frac{0,002}{2 \cdot \left(\frac{13}{1}\right)^{0,5}} \doteq 0,2274 \text{ m}\Omega$$

Dále také ze znalosti odporu tělesa kontaktu, který lze vypočítat jako:

$$R_p = \rho_{Cu} \cdot \frac{D_k}{2 \cdot S} \quad (\Omega; \Omega \cdot m, m, m^2) \quad (42)$$

je po dosazení roven hodnotě:

$$R_p = \left(\frac{1}{56,5} \cdot 10^{-6}\right) \cdot \frac{5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot (4,43 \cdot 10^{-3})^2} \doteq 2,869 \text{ }\mu\Omega$$

Z vypočítaných odporů ze vztahů (41) a (42) je možné dále vypočítat Jouleovy ztráty vznikající v kontaktu, které jsou úměrné tepelnému toku:

$$\sum \Delta P_j = \Delta P_k + \Delta P_p = (R_u \cdot I_n^2) \cdot 2 + (R_p \cdot I_n^2) = (0,2274 \cdot 10^{-3} \cdot 15^2) \cdot 2 + (2,869 \cdot 10^{-6} \cdot 15^2) \doteq 125,5 \text{ mW} \approx \Phi_{tep}$$

Oteplení kontaktu se určí podle vztahu:

$$\Theta_k = \Theta_o + \Phi_{tep} \cdot R_{Ta} \quad (K; K, W, K \cdot W^{-1}) \quad (43)$$

kteřé je po dosazení rovno:

$$\Theta_k = \Theta_o + \Phi_{tep} \cdot [\alpha_o \cdot (\pi \cdot D_k^2) \cdot 0,5 \cdot 2]^{-1} = 293,15 + 125,5 \cdot 10^{-3} \cdot [15 \cdot (\pi \cdot 5^2) \cdot 1]^{-1} \doteq 399,65 \text{ K}$$

Hodnota dovoleného oteplení kontaktu je rovna  $\Theta_{dov} = \Theta_m - 70 = 403,15 \text{ K}$ , což odpovídá hodnotě 130°C. Znamená to tedy, že velikost vypočtené hodnoty oteplení kontaktu  $\Theta_k$  (126,5°C) ze vztahu (43) vyhovuje požadavku pro splnění dovoleného oteplení kontaktu pro danou přitlačnou sílu.

## 5. SOFTWAREOVÁ PŘÍPRAVA FEM SIMULACE A JEJÍ VÝPOČET

Pro realizaci výpočtů bylo užito výpočtového softwaru „ANSYS Maxwell“, pomocí něhož byla sestavena FEM simulace modelu navržené konstrukce pohonu kontaktního systému. Model konstrukce byl vytvořen v programovém prostředí softwaru „SolidWorks 2014“, určeného pro 3D CAD navrhování.

Software „ANSYS Maxwell“ je špičkový simulační program určený pro výpočty elektromagnetických polí u různých provedení elektrických strojů a přístrojů, např. konstrukce elektromotorů, aktuátorů, senzorů, transformátorů a ostatních elektromagnetických a elektromechanických zařízení. [20]

Jde o vysoce výkonný a interaktivní software založený na metodě tzv. konečných prvků (MKP, anglicky pod zkratkou FEM – *finite element method*) pro numerická řešení elektrických a magnetických výpočtových problémů. Jako základ k těmto výpočtům využívá program všechny čtyři základní Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru: [22]

- 1) *Zákon celkového proudu (průtokový zákon)*

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (44)$$

kde  $\operatorname{rot} \mathbf{H}$  značí rotaci vektoru magnetické intenzity  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{J}_0$  proudovou hustotu vedeného proudu a  $\partial \mathbf{D} / \partial t$  tzv. posuvný proud. Fyzikálně řečeno, jde o vírové magnetické pole intenzity  $\mathbf{H}$  v oblasti s proudy, který je průvodním jevem elektrického proudu.

- 2) *Zákon elektromagnetické energie (indukční zákon)*

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (45)$$

kde  $\operatorname{rot} \mathbf{E}$  znamená rotaci vektoru intenzity elektrostatičeského pole  $\mathbf{E}$  a  $\partial \mathbf{B} / \partial t$  tzv. posuvný magnetický proud. Fyzikální interpretace zní tak, že časovou změnou magnetického pole vzniká vírové elektrické pole.

- 3) *Gaussova věta elektrostatiky*

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (46)$$

kde  $\operatorname{div} \mathbf{D}$  označuje zdroj elektrické indukce a  $\rho$  objemovou hustotu elektrického náboje. Fyzikální výklad zní tak, že existuje i elektrické pole zřídlové, jako průvodní jev elektrického náboje.

- 4) *Zákon spojitosti indukčního toku*

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (47)$$

Fyzikální interpretace: magnetické pole  $\mathbf{B}$  je nezřídlové.

Tyto uvedené rovnice v diferenciálním tvaru mají omezenou platnost, a to jen na danou výpočetní oblast, v níž se materiálové parametry  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  mění spojitě či nabývají konstantních hodnot. Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru postrádají platnost na ostrém rozhraní dvou různých prostředí (např. vodič – vzduch), které se musí doplnit o rovnice definující okrajové podmínky na rozhraní (a také i odpovídající počáteční podmínky). [8]

Celkový postup softwarové přípravy lze shrnout do několika hlavních bodů:

- 1) *Definice výpočtových parametrů modelu, které v sobě zahrnují:*
  - tvorbu a následný import modelu do programového prostředí
  - výběr výpočtového typu problému
  - definice počátečních a okrajových podmínek pro výpočetní model
- 2) *Nastavení pro výpočtovou analýzu:*
  - určení stupně složitosti generování výpočtové sítě pro MKP (nastavení *meshing*)
  - volba doby, preciznosti a typu řešiče výpočtu
- 3) *Výpočet problému a následná analýza výsledků*

### 5.1. Tvorba a import modelu

Jakožto první krok, který je zapotřebí k započetí FEM simulace, je vytvořit daný přístroj ve formě požadovaného modelu. Existují 2 možnosti, první z nich je možnost požadovaný model vymodelovat přímo v programovém prostředí „ANSYS Maxwell“. Druhou z možností je takovýto model vytvořit v jiném programovém prostředí a následně provést import do programu „ANSYS Maxwell“.

V této práci bylo využito druhé možnosti, kde byl použit k vymodelování přístroje software „SolidWorks 2014“, který představuje ucelené a robustní řešení pro 3D CAD navrhování, včetně možnosti modelování plechových dílů, svařenců, forem, vytváření sestav, mechanismů a kompletní výkresové dokumentace [23]. Tvorba modelu v programovém prostředí „SolidWorks 2014“ probíhá nejprve tak, že jsou navrženy tzv. *díly*, z nich je poté sestaven koncový (finální) model, tzv. *sestava dílů*. V této práci jsou díly daného modelu např. tělesa permanentních magnetů, vinutí cívky, těleso kotvy a magnetický obvod. Po sestavení koncového modelu poté následuje export modelu do požadovaného formátu, konkrétně pro program „ANSYS Maxwell“ je vhodný export do formátu *Parasolid (\*.x\_t)*.

Import do programu „ANSYS Maxwell“ je možný buď v podobě modelu ve 3D, nebo ve 2D, nebo ve 3D s možností konverze na 2D. Pro potřeby analýzy navržené konstrukce polarizovaného elektromagnetu je dostatečné využití simulace ve 2D vzhledem k tomu, že se jedná o jednoduchý model přístroje (simulace ve 3D by byla navíc časově náročnější se stejným výsledkem analýzy prosté funkce). Z tohoto důvodu tedy import proběhl pro 3D model, který byl vyexportován z programu „SolidWorks 2014“ a následně v programu „ANSYS Maxwell“ převeden do 2D podoby.

Import a převod modelu probíhá v programu „ANSYS Maxwell“ tak, že se nejprve zvolí prostředí (*Insert Maxwell 2D Design*, nebo *Insert Maxwell 3D Design*, nebo již přednastavená analýza příslušné konstrukce *Insert RMXprt Design*), na hlavním panelu se navolí položka „*Modeler* → *Import...*“ a vybere se příslušný soubor modelu ve formátu *Parasolid (\*.x\_t)*. Následně se na hlavním panelu navolí položka „*Maxwell 3D* → *Create 2D Design...*“ a v nově otevřeném okně se navolí možnost dané konverze. Pro konverzi jsou na výběr roviny řezu, vedoucí skrze daný model, na základě jeho pozice a orientace v kartézské soustavě (čili řez modelu skrze osy XY, YZ, nebo ZX), a dále jsou k dispozici 2 módy konverze 2D geometrie – první jakožto převod na standardní prostorové souřadnice XY a druhý jakožto převod na rotační těleso okolo osy Z. V této práci bylo zvoleno roviny řezu skrze osy ZX s konverzí na XY souřadnice.

## 5.2. Výběr výpočtového typu problému

Odpovídající sada Maxwellových rovnic slouží jako základ pro softwarové typové výpočty. V programu „ANSYS Maxwell“ jsou na výběr 4 řešitele výpočtových problémů, a to buď řešitele elektrostatického (*Electrostatic*), magnetostatického (*Magnetostatic*), časově závislého (*Transient*) či řešitele zahrnující vířivé proudy (*Eddy Current*). V této práci je užito časově závislého typu řešitele, který je konkrétně pro 2D výpočet určen rovnicí odvozenou z Maxwellových rovnic:

$$\operatorname{rot}(\nu \cdot \operatorname{rot} \mathbf{A}) = \underbrace{\mathbf{J}_e - \sigma \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \cdot \operatorname{grad} \varphi}_{\mathbf{J}_m = \sigma \cdot \mathbf{E}} + \operatorname{rot} \mathbf{H}_c + \sigma \cdot \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A} \quad (48)$$

kde  $\nu$  značí reluktivitu ( $\nu = \mu^{-1}$ ),  $\operatorname{rot} \mathbf{A}$  operaci rotace magnetického vektorového potenciálu  $\mathbf{A}$  ( $\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$ ;  $\operatorname{div} \mathbf{A} = 0$ ),  $\mathbf{J}_e$  externí proud, jakožto složku proudové hustoty vedeného proudu ( $\mathbf{J}_0 = \mathbf{J}_{in} + \mathbf{J}_e$ ),  $\sigma$  elektrickou vodivost,  $\varphi$  skalární elektrický potenciál,  $\mathbf{H}_c$  vektor koercitivity permanentního magnetu a  $\mathbf{v}$  vektor rychlosti. [8], [21], [22]

Výpočet simulace časově závislého problému v „ANSYS Maxwell“ může zahrnovat permanentní magnety, vodiče a vinutí s přivedeným zdrojem napětím (případně i s přivedeným zdrojem proudu) s možností nastavení různých funkcí, jako např. čas či rychlosti sepnutí nebo vypnutí. V softwaru je také k dispozici možnost zapojení takového vinutí do tzv. externího obvodového schéma. Program též umožňuje v simulaci možnost rotačních a posuvných pohybů určité části modelu (*Motion Setup*). Pro výpočet využívá tzv. *time-stepping* řešitele. [21]

## 5.3. Definice počátečních a okrajových podmínek

Po naimportování příslušného modelu a výběru typu výpočtového řešitele se přistupuje k nastavení okrajových podmínek.

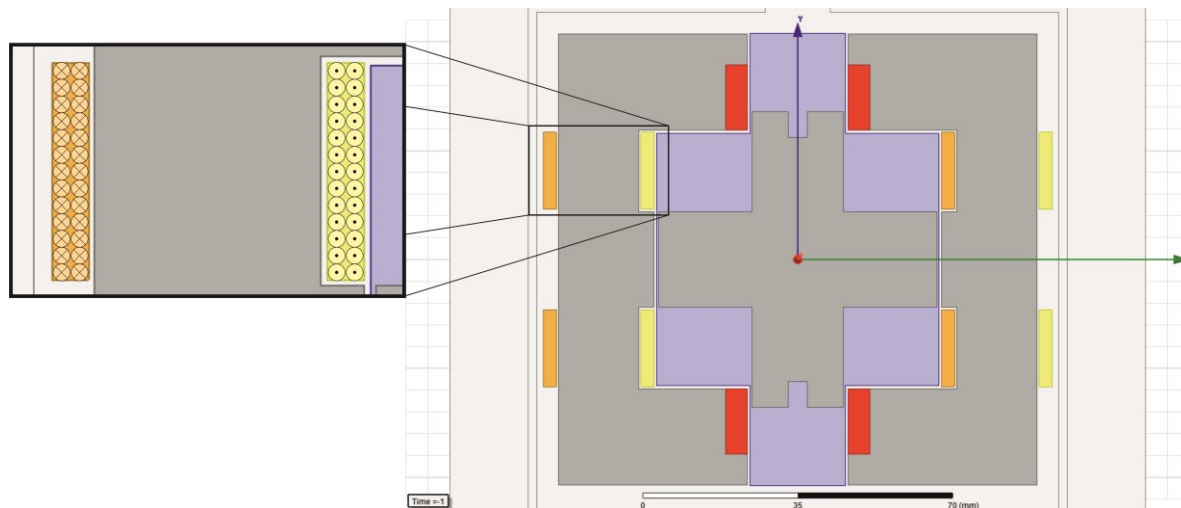
Jako první je nutné nastavit hranice výpočtového okolí, a to zadáním okrajových podmínek. Jinak řečeno, vytvořit hranice takové oblasti, která zahrnuje příslušný výpočtový model, která je tvořena vakuem či vzduchem (resp. permeabilitou  $\mu_0$ , co se tedy týče této práce) a na jejíchž okrajích platí Dirichletova podmínka  $A = 0$  – jde o podmínku, která udává znalost rozložení požadované veličiny na hranici dané oblasti, v tomto případě je magnetický vektorový potenciál roven nule.

Tato podmínka se v programu „ANSYS Maxwell“ zadává tím způsobem, že se vytvoří objekt zahrnující celý výpočtový model (na hlavním panelu položka „Draw → Rectangle“) a poté se označením vyberou pouze hrany tohoto objektu. Na tyto označené hrany objektu se vyvolá nabídka stisknutím pravého tlačítka myši (standardně v OS „MS Windows“) a vybere se pouze položka s názvem „Assign Boundary → Vector Potential...“. Tímto krokem dojde k přiřazení okrajové podmínky na vybrané hranice objektu. V „ANSYS Maxwell“ však existuje i alternativní možnost, a to přiřazení „Assign Boundary → Balloon...“, která umožní takové chování daných hranic, jako by se dále za těmito hranicemi jednalo o nekonečný prostor (čehož bylo využito i v této práci).

Jako další je zapotřebí nastavení počátečních podmínek, čímž je prakticky zamýšleno určení materiálových vlastností o určitých hodnotách materiálových konstant a jiných parametrů dané (vybrané) oblasti modelu.

### 5.3.1. *Oblast vinutí*

Na *Obr. 51* níže je vyobrazen řez modelem, v němž je zvětšená oblast vinutí jedné z cívek. Vyobrazená orientace závitů cívky je totožná pro všechny cívky.



*Obr. 51. Řez importovaným modelem s výrazněnými příslušnými oblastmi  
vlevo: přibližná oblast vinutí cívky s vyznačenou orientací závitů  
vpravo: vyobrazení celého výpočtového modelu*

Prvotně je nutné přiřadit příslušné oblasti vlastnosti daného materiálu, který tuto oblast reprezentuje. Pro přiřazení materiálu je zapotřebí označit danou oblast a stisknutím pravého tlačítka myši vyvolat nabídku, ze které se vybere položka „Assign Material...“. Po výběru této položky se zobrazí okno se seznamem různých materiálů, uložených standardně v materiálové knihovně programu „ANSYS Maxwell“, ze kterých je možné vybrat příslušný materiál. Konkrétně pro měď je materiál uložen pod názvem *Copper*. Kromě samotného výběru z nabídky materiálů je také možné daný materiál editovat a upravit určité parametry materiálu (hodnoty relativní permeability, vodivosti, BH křivku, aj.) s následným uložením materiálu do tzv. osobní materiálové knihovny, anebo vytvořit zcela nový materiál.

Po přiřazení vhodného materiálu, pro veškeré oblasti (objekty) reprezentující vinutí, přichází na řadu vlastní nastavení vlastností těchto oblastí jako tzv. vinutí (*Winding*). Nejprve je však zapotřebí znát určité parametry, které budou do tohoto nastavení zadávány. Konkrétně se jedná o počet závitů  $N$  připadající na jedno vinutí, ohmický odpor  $R_{\text{cvk}}$  daného vinutí a vstupní napětí  $U_2$  přivedené na vinutí.

Velikost vstupního napětí je rovna  $U_2 = 15 \text{ V}$ , jehož hodnota je součástí požadavků pro návrh konstrukce pohonu a je tedy pevně daná.

Pro vinutí bude užito vodiče o průřezu  $S_v = 1,5 \text{ mm}^2$ . Jeho průměr je tedy roven:

$$d_v = \sqrt{\frac{S_v \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 4}{\pi}} \doteq 1,382 \text{ mm}$$

Velikost objektu navrženého vinutí má v řezu rozměry o výšce 17,75 mm a šířce 3 mm. Tyto rozměry jsou dány jako maximální možné s ohledem na omezené rozměry konstrukce elektromagnetu tohoto typu.

Počet závitů cívky bude tedy dán na základě rozměrů navrženého vinutí a zvoleného průřezu vodiče:

$$N_a = \frac{17,75}{d_v} = \frac{17,75}{1,382} \doteq 12,84 \rightarrow 13$$

$$N_b = \frac{3}{d_v} = \frac{3}{1,382} \doteq 2,17 \rightarrow 2$$

$$N = N_a \cdot N_b = 13 \cdot 2 = 26$$

Závity  $N_b$ , připadající na šířku navržené cívky, zároveň odpovídají počtu vrstev navinutých závitů příslušného vinutí.

Pro výpočet odporu vinutí  $R_{cvk}$  se musí vyjít z velikosti hodnoty proudu  $I$ , který bude procházet přes příslušná vinutí. Hodnotu tohoto proudu lze odvodit na základě výpočtu magnetomotorického napětí  $F_m$ : [6]

$$F_m = \mu_0^{-1} \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_s \quad (49)$$

kde  $B_\delta$  lze vypočítat jako:

$$B_\delta = \sqrt{\frac{F_{ck} \cdot 2 \cdot \mu_0}{\varepsilon_\delta^2 \cdot S_{Fe}}} \quad (50)$$

Tažná síla na počátku zdvihu byla převzata z výpočtu celkové síly  $F_{ck}$  kladené na kontakt. Za plochu pólového nástavce  $S_{Fe}$  byla dosazena hodnota průřezu magnetického obvodu v místě navinutého vinutí. Činitel vyklenutí  $\varepsilon_\delta$  je možné vypočítat ze vztahu:

$$\varepsilon_\delta = 1 + \left( \frac{\delta}{d_{Fe}} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\delta}{d_{Fe}} \right)^2 \quad (51)$$

kde za průměr je možné dosadit náhradní hodnotu průměru  $d_{Fe}$  ekvivalentní k průřezu  $S_{Fe}$ :

$$d_{Fe} = \sqrt{\frac{S_{Fe} \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{(18,5 \cdot 10) \cdot 10^{-6} \cdot 4}{\pi}} \doteq 15,35 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_\delta = 1 + \left( \frac{2}{15,35} \right) - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{2}{15,35} \right)^2 \doteq 1,122$$

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře  $B_\delta$  ze vztahu (50) je poté rovna:

$$B_\delta = \sqrt{\frac{0,2489 \cdot 2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{1,122^2 \cdot (18,5 \cdot 10) \cdot 10^{-6}}} \doteq 51,84 \text{ mT}$$

Magnetomotorické napětí  $F_m$  ze vztahu (49) je poté po dosazení rovno:

$$F_m = (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7})^{-1} \cdot 51,84 \cdot 10^{-3} \cdot 35,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,182 \doteq 1730,95 \text{ A}$$

Činitel sycení  $k_s$  se zadává v rozmezí hodnot (1,15 – 1,4).



Hodnota proudu se nyní vypočítá odvozením z Hopkinsonova zákona: [6]

$$F_m = H \cdot l = N \cdot I \Rightarrow I = \frac{F_m}{N} = \frac{1730,95}{26} \doteq 66,575 \text{ A}$$

ze kterého lze nyní vypočítat požadovaný odpor vinutí  $R_{cvk}$ :

$$R_{cvk} = \frac{U_2}{I} = \frac{15}{66,575} \doteq 225,3 \text{ m}\Omega$$

Nyní již známé parametry lze zadat do vlastního nastavení vlastností vinutí, které se vytvoří stisknutím pravého tlačítka myši na položku v levém postranním menu s názvem „*Excitations*“ a výběrem položky „*Add Winding...*“. V nově otevřeném okně se navolí název vinutí (v této práci je uvedeno pod zkratkou „*wnd\**“), a zadá se hodnota odporu vinutí  $R_{cvk}$  a hodnota vstupního napětí  $U_2$  (hodnotu a polaritu vstupního napětí v čase je možné v rámci příslušné buňky naprogramovat logickými funkcemi dle potřeby).

Po vytvoření nastavení vinutí je dále zapotřebí k tomuto vinutí přiřadit příslušné závit, které vinutí tvoří. Tyto závity se tvoří tím způsobem, že se opět označí oblasti (objekty) reprezentující vinutí stejným způsobem, jako tomu bylo při přiřazování materiálu, avšak nyní se po stisknutí pravého tlačítka myši vybere položka „*Assign Excitation → Coil...*“. Po výběru této položky se zobrazí okno, ve kterém se zadá hodnota o počtu závitů  $N$  a jejich orientace (tok proudu v záporném směru osy  $Z$ , tj. „do obrazovky“, je označen jako „*Negative*“, směr toku proudu ve směru osy  $Z$ , tj. „z obrazovky“, je označen jako „*Positive*“). Orientace závitů jsou vyobrazeny na *Obr. 51* za předpokladu přivedeného kladného vstupního napětí  $U_2$ . Posledním krokem je poté přiřazení takto vytvořených závitů k již vytvořenému nastavení vinutí (*Winding*), a to stiskem pravého tlačítka myši na položku v levém postranním menu s názvem „*wnd\**“, nacházející se pod položkou „*Excitation*“, a zvolením položky „*Add Coils...*“. V nově otevřeném okně se poté ze seznamu vyberou všechny položky a potvrzením dojde k jejich přiřazení do vinutí.

Vinutí, které bylo tímto způsobem vytvořeno a nastaveno, se prakticky chová jako 4 samostatné cívky, navinuté na magnetickém obvodu, které jsou však společně zapojeny do série.

### 5.3.2. Oblast magnetického obvodu

Obdobným způsobem, jako tomu bylo pro oblasti vinutí, probíhá přiřazení daného materiálu pro příslušnou oblast reprezentující magnetický obvod. Pro magnetický obvod byl zvolen materiál ocele typu 11 600 (ČSN 41 1600).

Jedná se o typ konstrukční uhlíkaté oceli, která je procentuálně složena z příměsí 0,5 % C; 0,055 % P a 0,05 % S. Tato neušlechtilá ocel je vhodná pro použití na strojní součásti namáhané staticky i dynamicky, u nichž se nevyžaduje svařitelnost a také na součásti vystavené velkému měrnému tlaku. Užívá se pro hřídele, osy, ozubená kola, řetězová kola, páky, čepy, pístnice, kolíky, podpěry, držátka, objímky, šrouby a matice, klíny, pera, kluzné kameny, ozubené hřebeny, kladky, spojky, segmenty a vložky axiálních ložisek, distanční kroužky, různé upínací elementy, tělesa fréz, anebo také pro pásy a pruhy určené ke tvarování ohybem. Pro tento typ oceli se užívá ještě jiných označení jako: E 335, St 60-2, nebo Fe 590. [25]

Daný materiál se v materiálové knihovně programu „ANSYS Maxwell“ však nenachází (jen malá část různých typů ocelí), a je proto tedy nutné tento materiál nově vytvořit a nadefinovat jeho parametry.

Nejrychlejší způsob, jak vytvořit nový materiál, je funkce tzv. klonování jiného (nejlépe podobného) již nadefinovaného materiálu nacházející se v seznamu materiálové knihovny, a to tlačítkem „Clone Material(s)“. Poté se provádí samotná úprava parametrů materiálu, kde v rámci této práce postačí pro tento druh materiálu znalost tvaru BH křivky.

Tvar příslušné BH křivky je možné získat na základě měření požadovaného materiálu, z něhož získáme výstupní data ve formě tabulky. Hodnoty BH křivky ocele 11 600 byly propůjčeny z diplomové práce na VUT v Brně, viz Tab. 4 vpravo.

Znamé hodnoty BH křivky se poté zadávají buď jednotlivě do příslušných kolonek, anebo za pomoci importu již uložené tabulky dat v určitém formátu (\*.tab; \*.bh). Okno pro zadávání dat BH křivky se otevře kliknutím na tlačítko „B-H Curve...“ nacházející se ve sloupci „Value“, a to po zadání typu relativní permeability jako nelineární (sloupec „Type → Nonlinear“).

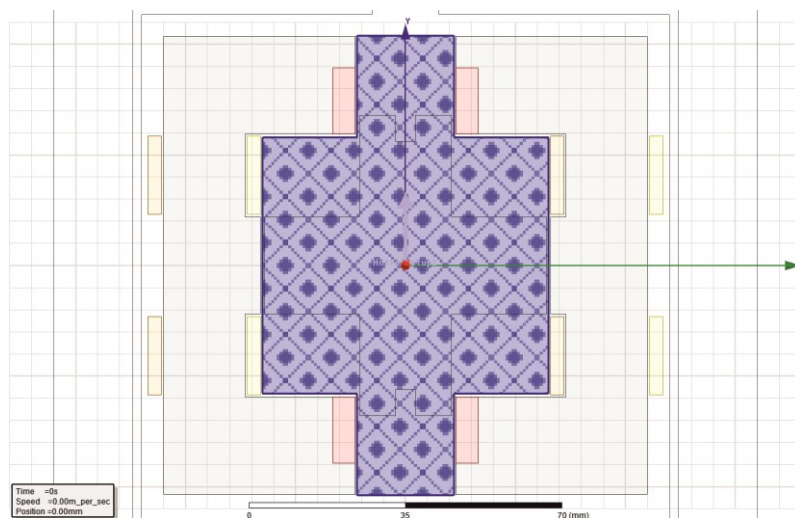
Tab. 4. Naměřené hodnoty BH křivky ocele 11 600 [14]

<b>B</b>	<b>H</b>
(T)	(A·m <sup>-1</sup> )
0,1	100
0,15	150
0,2	200
0,25	250
0,3	350
0,35	400
0,4	500
0,45	600
0,5	700
0,6	900
0,8	1550
1	2500
1,2	3750
1,4	5800
1,6	9750

### 5.3.3. Oblast tělesa kotvy elektromagnetu a jeho pohybu

Zcela totožným způsobem, jako tomu bylo pro magnetický obvod, probíhá přiřazení daného materiálu pro oblast reprezentující pohyblivé těleso kotvy elektromagnetu. Kotvy je tvořena stejným typem oceli 11 600, jako tomu je u magnetického obvodu.

Důležitou věcí, kterou je v této části nutné nadefinovat, je vytvoření oblasti, v níž bude konán právě samotný pohyb kotvy. Tato oblast se standardně nazývá „band“ a je vyobrazena na Obr. 52.



Obr. 52. Vyobrazení oblasti dráhy pohybu kotvy „band“

Obdobným způsobem, jako při tvorbě hranic výpočtového modelu, se vytvoří objekt požadovaného tvaru (např. za pomoci kreslicích nástrojů na hlavním panelu pod položkou „Draw“) v takovém místě modelu, kde je zamýšlena dráha pohybu kotvy (vytvořený objekt by se neměl překrývat či dotýkat se sousedními objekty, např. s magnetickým obvodem). Po jeho vytvoření se tento objekt označí, vyvolá se nabídka stisknutím pravého tlačítka myši a vybere se položka s názvem „Assign Band...“.

Poté se otevře okno určené pro nadefinování patřičných podmínek týkající se samotného pohybu kotvy (*Motion Setup*). V tomto nastavení se zadá posuvný typ pohybu (*Translation*), vektor pohybu jako „Global::Y“, počáteční pozice kotvy 0 mm a rozmezí dráhy pohybu mezi  $\pm 17,5$  mm. Dále se v tomto nastavení zadají parametry týkající se tělesa kotvy, kde se ponechá nulová počáteční rychlost a působící síla; zadá se hodnota tzv. tlumení (*Damping*) v rozmezí od 0,1 – 0,2 N·s·m<sup>-1</sup> (standardně se zadává hodnota 0,1) a jako poslední hmotnost kotvy. Hmotnost kotvy je možné v programu „ANSYS Maxwell“ automaticky vypočítat na základě známé měrné hustoty materiálu. V rámci této práce byla hmotnost kotvy vypočítána samostatně (též ze známé měrné hustoty materiálu a objemu tělesa kotvy) o výsledné hodnotě  $m = 186,21$  g.

Poslední parametr týkající objektu kotvy, je nastavení výpočtu síly, která je kladena na její těleso. Objekt kotvy se označí, vyvolá se nabídka stisknutím pravého tlačítka myši a vybere se položka s názvem „Assign Parameters → Force...“. V této práci byl tento výpočet pojmenován jako „F\_kotva“.

#### 5.3.4. Oblasti permanentních magnetů

Stejně, jako tomu bylo u předchozích oblastí, tak i pro oblasti reprezentující permanentní magnety proběhla definice materiálových vlastností tentýž způsobem. Výběr příslušných oblastí však je odlišný – vlastnosti zvoleného materiálu budou rozdílné pro permanentní magnety nacházející se na levé a na pravé straně poloviny modelu, konkrétněji bude odlišná orientace pólů magnetů, a to tak, že jejich severní póly budou směřovat proti sobě.

Jako materiál pro permanentní magnety byl po určitém výběru, který zahrnoval materiály typu AlNiCo, SmCo a NdFeB, nakonec zvolen právě NdFeB o jakosti typu N38. [17], [26]

Při zkušebních simulacích s permanentními magnety o materiálu AlNiCo nedosahovaly požadované „síly“ při přepolarizování elektromagnetu. Permanentní magnety SmCo již požadované „síly“ dosahovaly, avšak s přihlédnutím k jejich vysoké ceně a nižší mechanické pevnosti bylo přistoupeno k permanentním magnetům NdFeB (rozdíl mezi silovým působením SmCo a NdFeB byl v tomto případě minimální).

Materiál typu NdFeB se v materiálové knihovně programu „ANSYS Maxwell“ nachází, a to dokonce ve dvou dostupných jakostech (N30 a N35). V této práci bylo užito však vyšší jakosti typu N38, jejíž parametry byly získány z příslušných firemních katalogů (existuje minimálně 11 základních jakostí od N30 po N55; parametry NdFeB v katalogu jsou uvedeny pro celkem 78 jakostních typů [26]). Pro definování vlastností materiálu, konkrétně pro BH křivku, je možné využít buď naměřených dat příslušné BH křivky, anebo zcela postačí znalost hodnoty relativní permeability a hodnoty magnetické koercitivity (BH křivka NdFeB ve II. kvadrantu vykazuje takřka lineární průběh). Směr orientace pólů magnetů se určuje zadáním jednotkového vektoru do kolonky „X/Y/Z Component“. Permanentní magnety na levé straně modelu budou mít v kolonce „X Component“ zadáný kladný vektor, na pravé straně záporný.

#### 5.4. Nastavení výpočetní analýzy

Po nastavení příslušných podmínek a materiálových vlastností se přistupuje k vytvoření výpočetní sítě (*mesh*), jakožto podstata a výpočetní základna metody konečných prvků (MKP). Základní myšlenkou MKP je rozložení daného modelu tělesa na menší elementární části (konečné prvky), na kterých je prováděna analýza požadovaných veličin. Analýza je o mnoho jednodušší oproti analýze celistvého povrchu či objemu tělesa [24]. Rozložením dojde k vytvoření provázané sítě, která má charakter polygonů tvořící na povrchu trojúhelníkové elementy, či v objemu elementy o tvarech čtyřstěnů. Celistvá síť je poté tvořena uzly, v nichž je realizován výpočet ve formě parciálních diferenciálních rovnic. Tyto uzly jsou poté označovány za tzv. *stupně volnosti*.

Analýza konečných prvků je účinná metoda, která se uplatňuje k řešení všech okrajových úloh inženýrské praxe, popsanych diferenciálními rovnicemi. MKP se zavádí v oblastech pro výpočet polí, uzlů a uzlových potenciálů. Uzly mohou být rozloženy v dané oblasti nerovnoměrně a mohou tak do určité míry sledovat tvar hraničních polí. V místech, kde je očekávaná prudká změna pole a která jsou předmětem zájmu, se zpravidla zavádí vyšší hustota výpočetní sítě (zjemnění sítě) a naopak místa, která se vyznačují nízkou mírou změny pole, se tvoří řidší výpočetní síť. [13]

Postup metody konečných prvků lze shrnout do několika základních kroků: [24]

- Rozdělení řešené oblasti na podoblasti, čili na elementy, konečné prvky.
- Formulace chování jednotlivých elementů – matematický popis ve formě maticového zápisu.
- Opětovné složení elementů a získání výsledné soustavy rovnic popisující chování celého systému využitím rovnic získaných při analýze těchto elementů.
- Aplikace okrajových a počátečních podmínek.
- Vlastní řešení systému rovnic. Získání primárních neznámých.
- Získání dodatečných (odvozených) výsledků.

Požadovaný výpočet je v softwaru „ANSYS Maxwell“ řešen tak, že pro každý element je výpočet aproximován z příslušných uzlových hodnot za pomoci kvadratického polynomu 2. řádu:

$$A_z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (52)$$

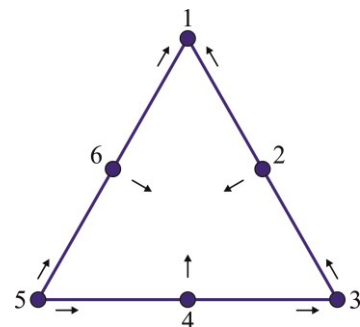
Pro 2D výpočet tedy probíhá aproximace v každém elementu z 6 uzlů, viz vztah (52) a Obr. 53.

Dále „ANSYS Maxwell“ využívá tzv. variačního principu MKP, kde *Poissonova rovnice*:

$$\nabla^2 A = -\mu \cdot J \quad (53)$$

je nahrazena tzv. *energetickým funkcioálem*:

$$F(A) = \frac{1}{2} \int \left( \frac{\nabla A \cdot \nabla A}{\mu} + A \cdot J \right) dV \quad (54)$$



Obr. 53. Interpolační schéma základního trojúhelníkového elementu [21], [22]

Tento funkcioál minimalizuje celkový počet uzlů u všech elementů, s respektováním hodnoty magnetického vektorového potenciálu  $A$ . Po tomto nahrazení je konečný výsledek výpočtů, skrze

všechny elementy, roven tzv. řídké matici výpočtů. Maticový popis výpočtu v softwaru „ANSYS Maxwell“ vypadá následovně:

$$[\mathbf{S}] \cdot [\mathbf{A}] = [\mathbf{J}] \quad (55)$$

kde matice  $[\mathbf{A}]$  obsahuje aproximované hodnoty magnetického vektorového potenciálu  $A$ . [21], [22], [24]

Koeficienty matice soustavy a pravých stran jsou počítány jako integrály přes elementární plochy nebo objemy, v jejichž vrcholech se nachází uzly [13]. Pro samotný výpočet matice užívá „ANSYS Maxwell“ standardně Gaussovu eliminační metodu. [21], [22]

Počáteční výpočtová síť (*mesh*) je v programu „ANSYS Maxwell“ při zahájení analýzy standardně vygenerována automaticky bez předchozích nastavení. Proces vytvoření této sítě probíhá následovně: [22]

- Kontrola modelu z hlediska chyb a případných průsečíků.
- Vytvoření základní sítě ve formě bodů, pro získání informací o rozložení geometrie a vrcholů modelu.
- Vytvoření povrchové sítě zakřivených objektů za pomoci povrchové aproximace, tzv. plošné triangulace.
- Porovnání povrchové sítě mezi objekty a vytvořenými body.
- Zjemnění výpočtové sítě na základě daného nastavení, podle zadané délky hrany elementu (*Length Based*), nebo na základě obrysů dané oblasti při jejím povrchu – využití zejména při analýze skinefektu (*Skin Depth Based*).
- Využití informace o struktuře sítě v následné analýze.

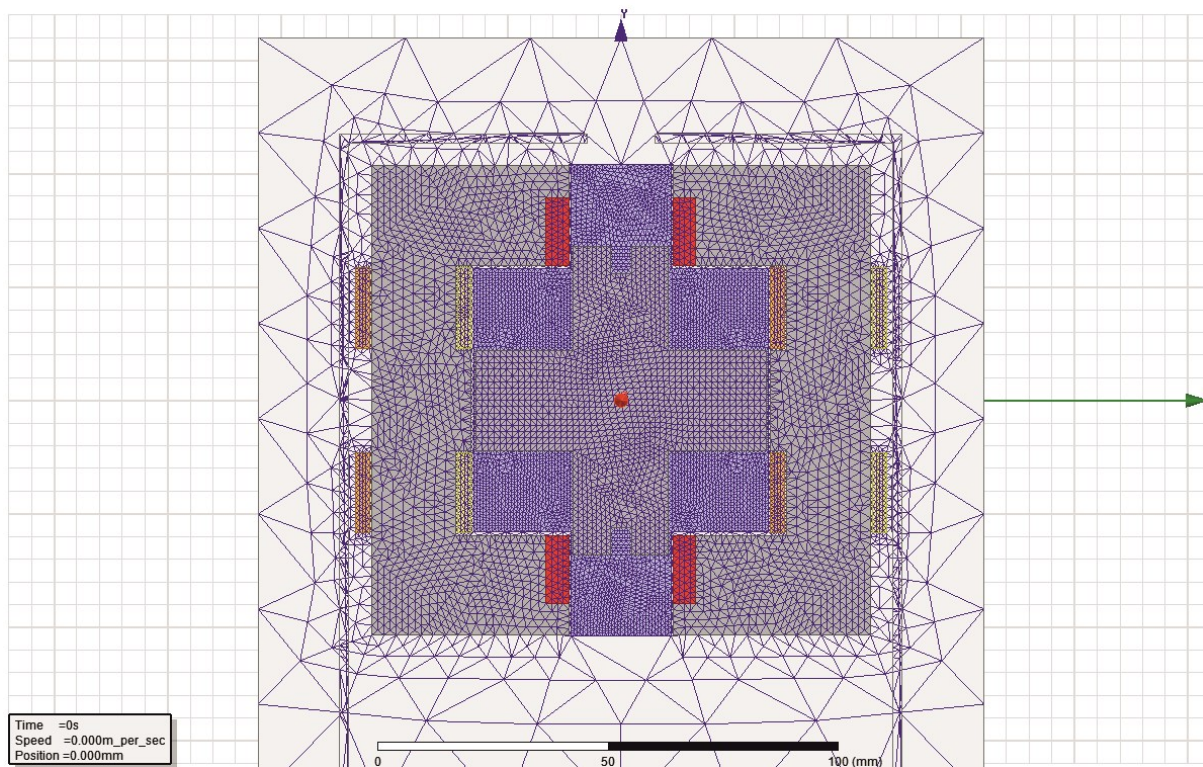
V „ANSYS Maxwell“ existuje ještě možnost vytvoření tzv. adaptivní výpočtové sítě, jejímž cílem je rozpoznat právě ta místa, která jsou oblastí zájmu, tzn. kde je značný předpoklad rychlé změny pole. Vygenerování tohoto typu výpočtové sítě je však v „ANSYS Maxwell“ možné jen s použitím stacionárních řešitelů (*Electrostatic*, *Magnetostatic*). Pro časově závislý řešitel (*Transient*) je možné tento typ sítě aplikovat jen přes tzv. kopii výpočtové sítě z již vygenerované adaptivní výpočtové sítě ze stacionárního řešitele.

V „ANSYS Maxwell v16“ jsou k dispozici následující možná nastavení generování výpočtové sítě:

- *On selection* - nastavení maximálního rozměru či počtu daných elementů na povrchu vybrané oblasti objektu (nastavení možné jako *Length Based* a *Skin Depth Based*)
- *Inside selection* - obdobné nastavení maximálního rozměru (délky) daného elementu, ale uvnitř vybrané oblasti (nastavení jen jako *Length Based*)
- nastavení povrchové aproximace
- nastavení na základě rozlišení daného modelu
- nastavení v závislosti na rotační (válcové) vzduchové mezeře

V této práci bylo užito nastavení *Inside selection* s volbou pevné délky trojúhelníkového elementu. Nastavení může být v „ANSYS Maxwell“ aplikováno buď na celý model, nebo můžou být různá nastavení aplikována na určité oblasti výpočtového modelu, anebo ponechána bez nastavení (program v tomto případě zvolí výchozí nastavení generování výpočtové sítě jako *On selection*). [22]

Nastavení délek elementů bylo v této práci aplikováno na určité oblasti různě (v levém postranním menu „*Mesh Operations* → *Assign* → *Inside Selection* → *Length Based...*“), konkrétně pro oblast, která je určena pro posun kotvy (*band*), byla zvolena délka 1,5 mm; pro těleso kotvy a permanentních magnetů délka 2 mm; pro vinutí cívek 1,5 mm; pro objekt magnetického obvodu 3 mm a pro okolí bylo ponecháno výchozí nastavení. Celkový počet trojúhelníkových elementů, vygenerovaných pro daný model v této práci, dosahuje počtu 14 832.



Obr. 54. Rozložení výpočtové sítě podle příslušného nastavení pro výchozí pozici kotvy 0 mm

Poslední náležitostí před započítím samotného řešení analýzy je obecné nastavení analýzy (v levém postranním menu „*Analysis* → *Add Solution Setup...*“), v níž se určí doba a krok výpočtu pro analýzu provozního děje elektromagnetu. V této práci byla navolena celková doba trvání výpočtu děje na 120 ms s krokem výpočtu po 0,1 ms. Po tomto nastavení již nic nebrání k zahájení výpočtové FEM simulace.

Během probíhající analýzy je možné si již připravit příslušné náhledy rozložení magnetického pole a grafy závislostí. Neprodleně po dokončení každého kroku výpočtu je možné vyobrazení právě příslušného rozložení pole či výsledků v grafu, které se neustále aktualizují v závislosti na probíhajícím procesu výpočtu. Tato práce je zaměřena na výzkum provozních funkcí polarizovaného elektromagnetu a jeho vlastností, a proto jsou ve výsledném grafu simulace elektromagnetu vyobrazeny tyto průběhy závislostí na čase:

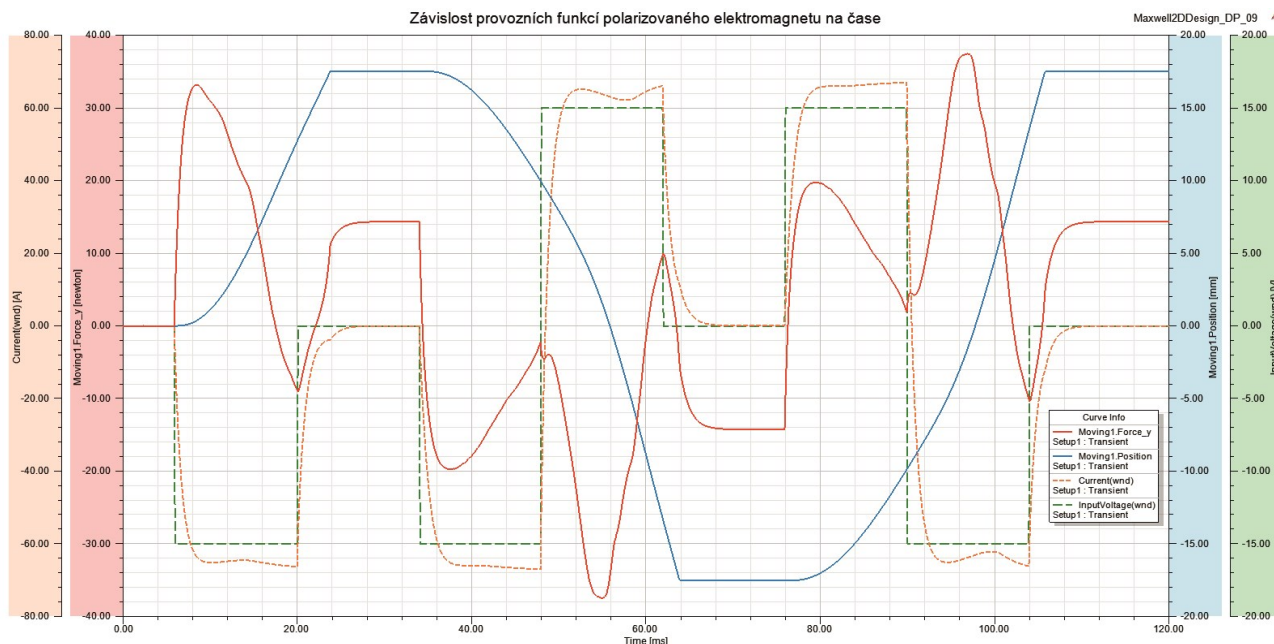
- průběh síly působící na těleso kotvy (*Moving1.Force\_y*)
- průběh pozice kotvy (*Moving1.Position*)
- průběh okamžité hodnoty proudu a napětí ve vinutí (*Current(wnd)*, *InputVoltage(wnd)*)

Vyobrazená rozložení magnetického pole jsou konkrétně pro magnetickou indukci  $B$ , magnetickou intenzitu  $H$  a magnetický tok  $\Phi$ .



## 6. VYHODNOCENÍ A ANALÝZA VYPOČTENÝCH VÝSLEDKŮ

Po předchozích nastaveních a definování potřebných náležitostí se již přistupuje k samotné analýze provedené simulace. Na Obr. 55 níže je vyobrazen výsledný graf různých závislostí na čase:



Obr. 55. Graf závislosti provozních funkcí polarizovaného elektromagnetu na čase

Konkrétně červený průběh náleží závislosti působení síly na těleso kotvy, modrý průběh závislosti aktuální pozici kotvy, čárkovaný oranžový průběh závislosti proudu panující ve vinutí a čárkovaný zelený průběh závislosti napětí (resp. polarity napětí) přivedeného na vinutí.

Celková doba výpočtového děje je 120 ms s délkou trvání jednoho kroku 0,1 ms. Doba trvání samotné výpočtové analýzy trvala 3 hodiny 46 minut (za použití 4 jádrového procesoru).

### 6.1. Výchozí poloha kotvy

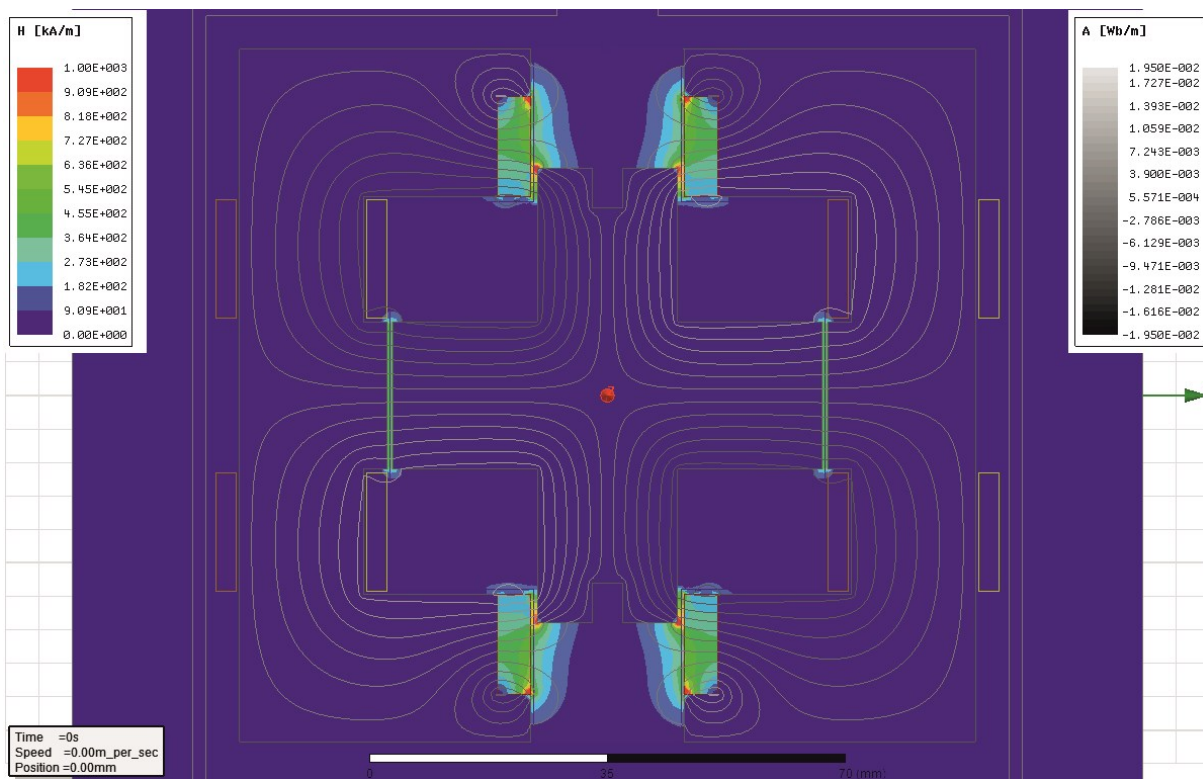
Počáteční poloha kotvy se nachází ve středu výpočtového modelu, která odpovídá pozici kotvy 0 mm. Tato pozice je díky navržené konstrukci elektromagnetu, jehož kotva je v blízkosti všech čtyř permanentních magnetů, do určité míry stabilní. V případě, že se kotva nachází v této poloze a nepůsobí na ni žádná vnější síla (tedy i gravitační síla), kotva aperiodicky osciluje kolem pozice 0 mm v řádově v desítkách  $\mu\text{m}$ . V případě, že se kotva vychýlí z této počáteční polohy, bude mít kotva tendenci neustále se vracet právě do původní počáteční pozice 0 mm, což se poté projevuje jako oscilace kotvy okolo této pozice. Čím vyšší je velikost výchylky kotvy od výchozí polohy, tím vyšší je počáteční amplituda aperiodického průběhu a o to déle se projevuje samotná délka trvání oscilace (nejdéle však přibližně kolem 1 s). Z dodatečně provedené simulace plyne, že nejvyšší hodnota výchylky kotvy pro to, aby došlo k zmíněné oscilaci kotvy, odpovídá pozicím  $\pm 11,8$  mm. V případě, že vychýlení kotvy přesáhne pozici odpovídající  $\pm 11,8$  mm, bude mít kotva již tendenci pro přitah či odtažení kotvy do příslušné krajní polohy.

Pro určité aplikace, kde je požadována i střední poloha kotvy elektromagnetu, je tento typ konstrukce vhodný. Pro aplikaci pohonu v této práci, kde je požadavek jen 2 krajních poloh, jde však o menší komplikaci, která se týká elektronického řízení tohoto elektromagnetu.





Ve vzduchových mezerách, v blízkosti permanentních magnetů a kotvy, se pohybují hodnoty magnetické intenzity v rozmezí  $H \approx 600 - 800 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$  a přímo v tělese permanentních magnetů se pohybují hodnoty v rozmezí  $H \approx 200 - 500 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ .



Obr. 57. Rozložení pole magnetické intenzity  $H$  společně s magnetickým tokem pro výchozí pozici kotvy 0 mm

Magnetický tok  $\Phi$  je na Obr. 57 vyobrazen prostřednictvím magnetického vektorového potenciálu  $A$ , který se zavádí z důvodu zjednodušení výpočtu, kde magnetický tok  $\Phi$  (tok vektoru  $\mathbf{B}$  přes danou plochu  $S$ ) je transformován z plošného integrálu na křivkový integrál, jak je vidět ze vztahu (56): [8]

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \int_S \text{rot} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} = \oint_l \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad (56)$$

Magnetický tok  $\Phi$  je roven cirkulaci vektoru  $\mathbf{A}$  po okrajové křivce  $l$  plochy  $S$ . Světlejší tóny šedé až bílé barvy siločar magnetického toku (kladné hodnoty magnetického vektorového potenciálu) značí orientaci směru cesty uzavírání toku proti směru hodinových ručiček, naopak tmavší tóny šedé až černé barvy siločar magnetického toku (záporné hodnoty magnetického vektorového potenciálu) značí orientaci směru toku po směru hodinových ručiček.

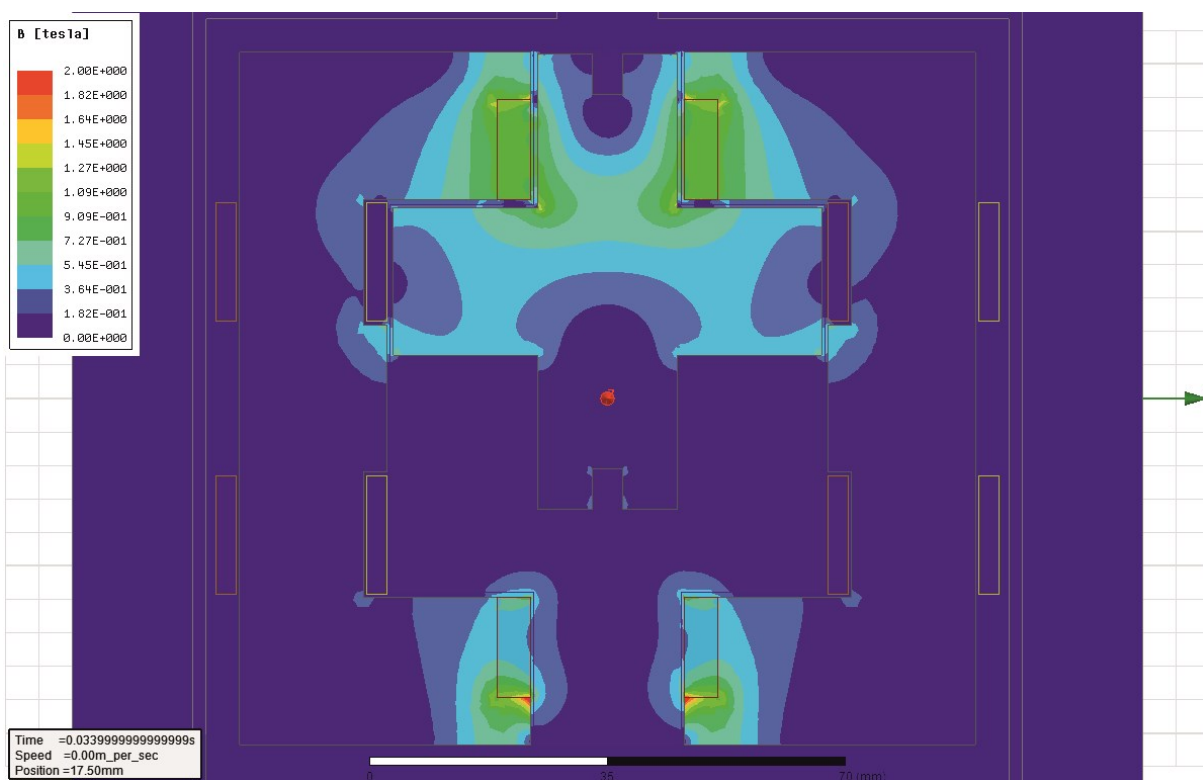
Po uplynutí doby 6 ms bylo na přívod vinutí přivedeno napětí  $U_2$  o velikosti -15 V s délkou trvání impulzu 14 ms, aby došlo k polarizaci elektromagnetu a kotva se prvotně přitáhla do krajní polohy (Obr. 55, případně Příloha č.1). Reálně by tohoto prvotního impulzu nebylo zapotřebí, jelikož se předpokládá, že kotva elektromagnetu se bude již nacházet v jedné z krajních poloh.

## 6.2. První krajní poloha kotvy

Na základě grafu závislosti na Obr. 55 se kotva elektromagnetu nachází v čase 24 – 34 ms v první krajní poloze 17,5 mm, v níž tedy setrvala 10 ms.

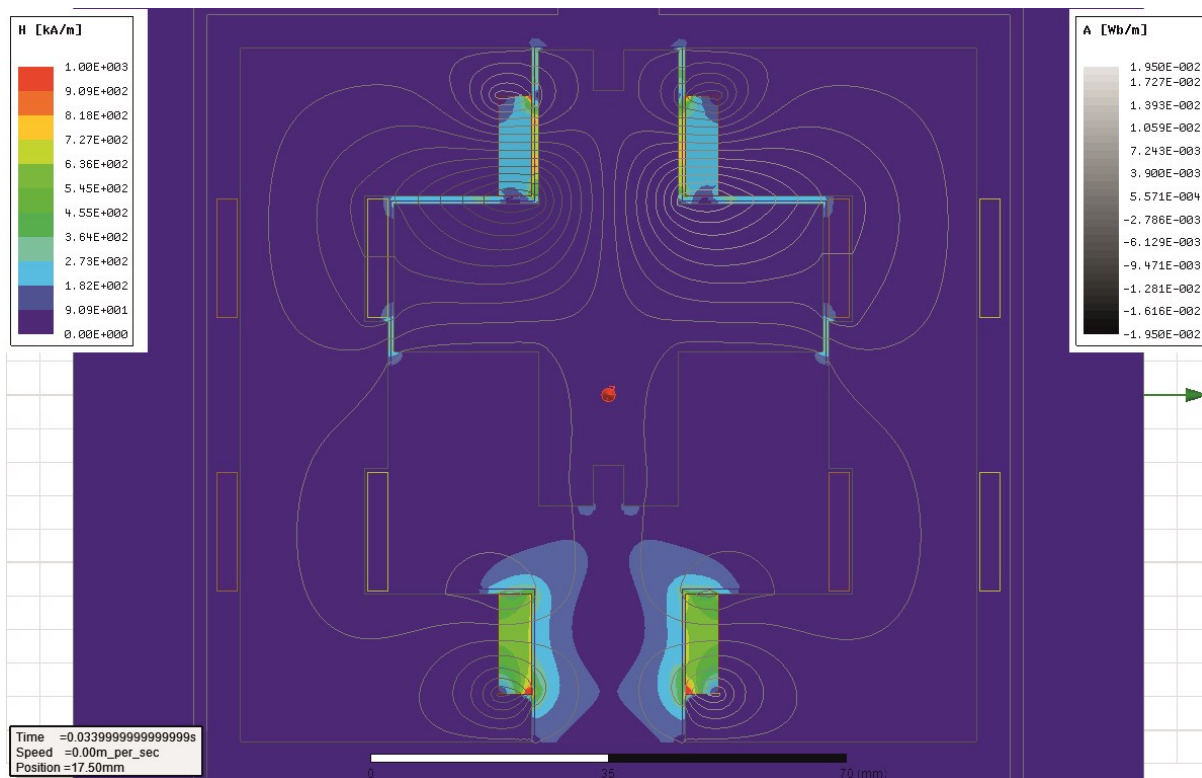
Ačkoliv je možná maximální pozice kotvy v krajní poloze 17,75 mm, která byla zjištěna na základě měření dráhy posuvu táhla kotvy kontaktního můstku vně kontaktního systému (viz Tab. 3), byla z důvodu optimalizace silového působení zvolena jako krajní poloha kotvy pozice 17,5 mm. Velikost přídržné síly, která působí na těleso kotvy a potažmo i na kontaktní můstek v místě kontaktu vlivem permanentních magnetů, je pro krajní polohu kotvy 17,5 mm rovna  $F = 14,3$  N. Tato hodnota silového působení je vyšší, než vypočtená průměrná hodnota přítláčné síly dostačující pro přítlak kontaktu  $F_{kp} = 12,75$  N, což má však poté za následek (dle výpočtu) nižší hodnotu oteplení kontaktu, a to z původní hodnoty  $\Theta_k = 399,65$  K (126,5°C) na hodnotu oteplení kontaktu  $\Theta_k = 393,9$  K (120,75°C).

Minimální vzdálenosti vzduchových mezer, které se nachází mezi kotvou a magnetickým obvodem, byly voleny již při samotných návrzích pro jednotlivé konstrukce elektromagnetů, u nichž bylo cílem dosáhnout pokud možno optimálních vzdáleností vzduchových mezer z hlediska spolehlivosti během provozu (při pohybu tělesa kotvy), velikosti magnetického odporu a technologie výroby. Tato minimální vzdálenost vzduchových mezer byla ustálena na  $\delta = 1$  mm. Vzduchová mezera, která se nachází mezi magnetickým obvodem a rameny kotvy v pozici krajní polohy ( $\pm 17,5$  mm), odpovídá velikosti  $\delta = 1,25$  mm – tento prostor bude tvořen nemagnetickým materiálem (s odpovídající relativní permeabilitou, např. mosazí) k zajištění vzdálenosti  $\delta$  a s funkcí tlumení nárazu při dojezdu kotvy do krajní polohy. Permanentní magnet o složení NdFeB je křehký materiál, jehož struktura by se mohla právě při dojezdu kotvy snadno porušit a dojít k jeho odštípnutí.



Obr. 58. Rozložení pole magnetické indukce  $B$  pro krajní pozici kotvy 17,5 mm

Na Obr. 58 je vyobrazeno rozložení pole magnetické indukce pro krajní polohu kotvy 17,5 mm. Nejvyšší hodnoty magnetické indukce  $B$  se opět projevují v blízkosti permanentních magnetů a v místech ostrých hran tělesa kotvy, kde prochází cesta polarizačního magnetického toku. Konkrétně v tělesech permanentních magnetů, které přidržují kotvu elektromagnetu, dosahuje magnetická indukce hodnot přibližně  $B \approx 1$  T. V místech, kudy prochází magnetický tok přes kotvu, dosahuje magnetická indukce hodnot  $B \approx 0,6 - 1$  T v blízkosti permanentních magnetů a ve zbylé části tělesa kotvy hodnot  $B \approx 0,5$  T. Hodnoty magnetické indukce  $B \approx 0,5$  T dosahují také tělesa permanentních magnetů, které se nachází v protilehlé krajní poloze. Magnetická indukce ve vzduchové mezeře, mezi magnetickým obvodem a rameny kotvy, dosahuje hodnot  $B \approx 0,2$  T.



Obr. 59. Rozložení pole magnetické intenzity  $H$  s magnetickým tokem pro pozici kotvy 17,5 mm

Velikost pole magnetické intenzity  $H$  na Obr. 59 dosahuje nejvyšších hodnot opět ve vzduchových mezerách v blízkosti pólů permanentních magnetů. Magnetická intenzita v tělesech permanentních magnetů, přidržujících kotvu elektromagnetu, se snížila na hodnotu  $H \approx 200$  kA·m<sup>-1</sup> a naopak v tělese permanentních magnetů v protilehlé krajní poloze se magnetická intenzita navýšila na hodnotu  $H \approx 700$  kA·m<sup>-1</sup>. Ve vzduchových mezerách, mezi magnetickým obvodem a rameny kotvy, přes které se uzavírá převážná část polarizačního magnetického toku, dosahuje magnetická intenzita hodnot kolem  $H \approx 200 - 300$  kA·m<sup>-1</sup>.

Magnetický tok se uzavírá převážně přes ramena kotvy elektromagnetu, která setrvává v krajní poloze. Právě tato cesta polarizačního magnetického toku  $\Phi_{\text{pol}}$  přidržuje kotvu elektromagnetu v požadované krajní poloze, a to až do doby, kdy bude již zapotřebí přepnutí kontaktního systému a na vstup vinutí bude přiveden pulz napětí  $U_2 = -15$  V pro přepolarizování elektromagnetu do druhé krajní polohy (v rámci simulace k tomuto přepnutí došlo v čase 34,1 ms). Zbylá část polarizačního magnetického toku, která se neuzavírá přes ramena kotvy, pouze napomáhá k rychlejšímu přepolarizování elektromagnetu v okamžiku ještě před samotným dojezdem kotvy do krajní polohy.

### 6.3. Okamžik přepolarizování elektromagnetu

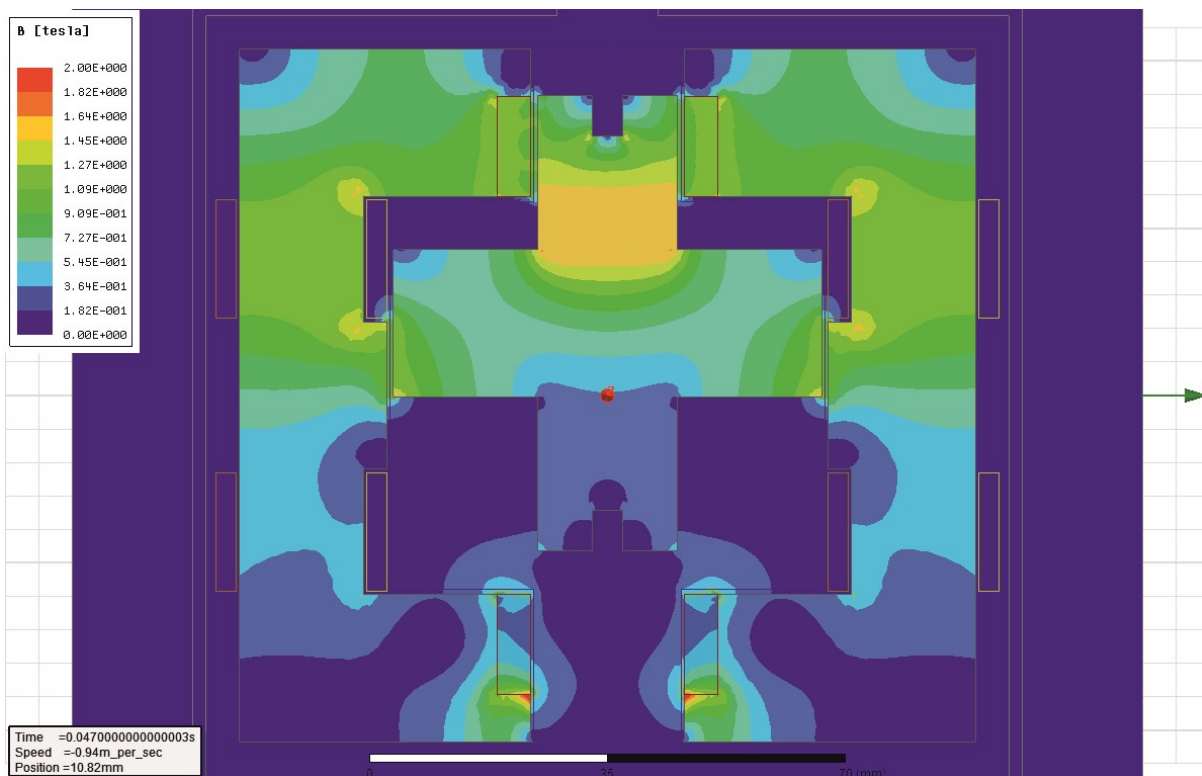
Po přivedení napětí o velikosti  $U_2 = -15$  V na vstup vinutí, započne nárůst řídicího proudu  $I_r$ , který sleduje stav a velikost tohoto přivedeného napětí, podle něhož je určen průběh proudu ve vinutí, který má v konečném důsledku charakter impulsu. Tento impuls bude zajišťován pomocí příslušné řídicí polovodičové elektroniky (FET tranzistory) vybavenou vybíjecím kondenzátorem. Řídicí proud ve vinutí (navinuté na část magnetického obvodu) postupně vytváří magnetomotorické napětí  $F_m$ , které je úměrné magnetickému poli v prostoru kolem cívky. Vliv magnetického pole způsobuje sycení magnetického obvodu magnetickou indukcí  $B$ , což vede ke vzniku proudění řídicího magnetického toku  $\Phi_r$ . Vlivem sycení magnetického obvodu poté dochází k elektromechanické interakci s tělesem kotvy, v níž vzniká elektromagnetický moment  $M_e$  způsobující právě pohyb kotvy.

V provedené simulaci na Obr. 55 bylo napětí  $U_2$  o záporné polaritě přivedeno na vinutí v čase 34 ms po dobu trvání impulsu 14 ms. Vzniklý řídicí magnetický tok  $\Phi_r$  poté započal působit na polarizační magnetický tok  $\Phi_{pol}$ , a to konkrétně dvojím způsobem:

Magnetický tok  $\Phi_r$  začal působit jednak proti smyslu působení polarizačního magnetického toku  $\Phi_{pol}$ , který přidržoval těleso kotvy v první krajní poloze, což vedlo k výslednému rozdílu těchto dvou magnetických toků v příslušné vzduchové mezeře (mezi magnetickým obvodem a rameny kotvy) a došlo tedy k uvolnění kotvy elektromagnetu z krajní polohy.

A dále jednak začal působit ve stejném smyslu, jako polarizační magnetický tok  $\Phi_{pol}$ , a to cestou, která je vyobrazena na Obr. 61. Výsledkem tohoto působení byl součet obou magnetických toků, které přispěly k dalšímu zmagetování permanentních magnetů, což mělo celkově za následek rychlejší odtah kotvy elektromagnetu z první krajní polohy, v níž předtím setrvala.

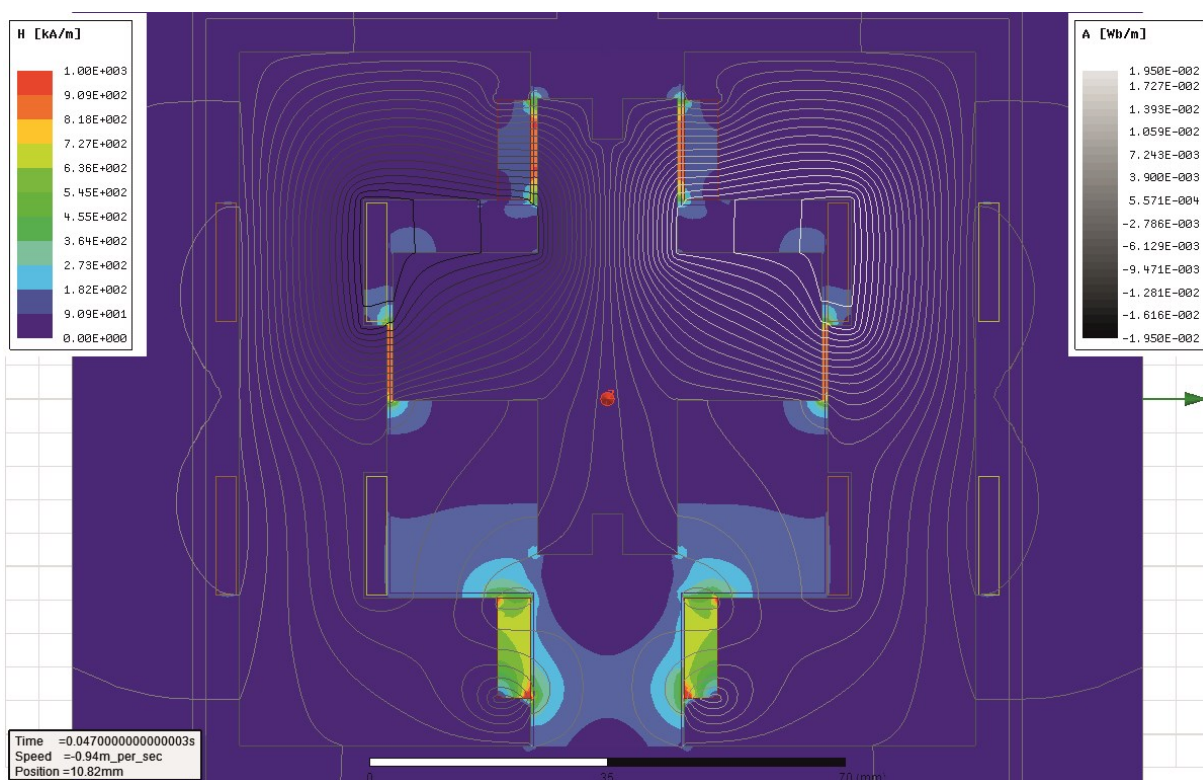
Rozložení pole magnetické indukce v době sycení magnetického obvodu vlivem řídicího proudu je vyobrazeno na Obr. 60.



Obr. 60. Rozložení pole magnetické indukce  $B$  pro pozici kotvy 10,82 mm



Nejvyšší hodnoty magnetické indukce  $B$  se projevují nyní v tělese kotvy a v magnetickém obvodu zdroje sycení (vně cívek vinutí), kudy prochází společná cesta obou magnetických toků. Konkrétně v tělese kotvy dosahují hodnoty magnetické indukce  $B \approx 1,55$  T s nejvyšší hustotou magnetického toku a s nižší hustotou (tedy v místech průchodu magnetického toku přes zbylou oblast kotvy) kolem  $B \approx 0,6 - 1,2$  T. V místě zdroje sycení magnetického obvodu (na němž jsou navinuta vinutí bližší k první krajní poloze) dosahuje magnetická indukce hodnot  $B \approx 1,1 - 1,3$  T. Sycení magnetického obvodu se zúčastňují všechna 4 vinutí, kde 2 vinutí bližší k druhé krajní poloze dosahují přibližně polovičních hodnot sycení, než tomu je u protilehlých vinutí ( $B \approx 0,5$  T). Hodnot magnetické indukce  $B \approx 1,1 - 1,2$  T dosahují tělesa permanentních magnetů a hodnot  $B \approx 0,9 - 1$  T část magnetického obvodu, přes které prochází oba magnetické toky.



Obr. 61. Rozložení pole magnetické intenzity  $H$  s magnetickým tokem pro pozici kotvy 10,82 mm

Nejvyšších hodnot magnetické intenzity  $H$ , podle rozložení pole na Obr. 61, dosahují všechny vzduchové mezery, které se nachází mezi tělesem kotvy elektromagnetu a blízkým magnetickým obvodem (popř. permanentními magnety v první krajní poloze) a přes které prochází cesta magnetického toku, a to hodnot o velikosti magnetické intenzity  $H \approx 900$  kA·m<sup>-1</sup>. Magnetická intenzita ve vzduchových mezerách, kolem druhé krajní polohy (v části prostoru „band“), dosahuje hodnot  $H \approx 100 - 200$  kA·m<sup>-1</sup>; v tělesech permanentních magnetů v první poloze  $H \approx 100$  kA·m<sup>-1</sup> a v druhé poloze  $H \approx 500 - 700$  kA·m<sup>-1</sup>.

Jak je vidět na Obr. 61, část polarizačního magnetického toku (vystupující z permanentních magnetů, které v předchozí první krajní poloze přidržovali kotvu elektromagnetu) se již neuzavírá přes blízký magnetický obvod, ale uzavírá se přes těleso kotvy elektromagnetu společně s původním většinovým magnetickým tokem. U protilehlých permanentních magnetů se tato část polarizačního toku stále uzavírá přes svoji původní cestu (mimo těleso kotvy). Dále je podle vyobrazeného magnetického toku zjevné, že část cesty magnetického řídicího toku, vedoucí přes magnetický obvod

vinutí cívek blíže druhé krajní polohy, se uzavírá přes těleso kotvy a také napomáhá jejímu odtahu do druhé krajní polohy.

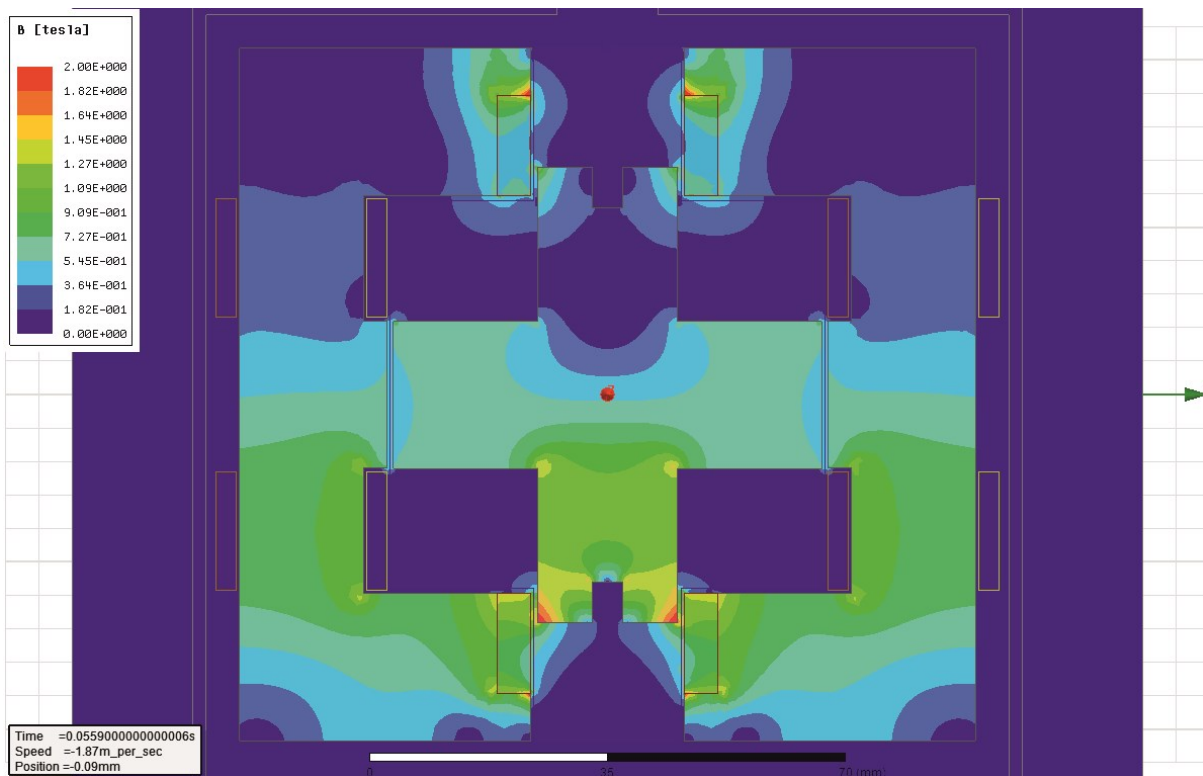
Stav, kdy další zmagnetování permanentních magnetů (při přepolarizování elektromagnetu) přispělo k výraznější silové interakci pro rychlejší odtah kotvy, trvá vždy jen po určitou dobu v závislosti na aktuální pozici kotvy. Na základě provedené simulace (*Obr. 55*) by delší působení napěťového impulsu vedlo k tendenci ustálení kotvy ve výchozí poloze, jak tomu je v kapitole 6.1. (kotva se totiž v čase 48 ms nachází již za hranicí polohy kotvy 11,8 mm a přivedené napětí  $U_2$  záporné polarity na vstup vinutí tuto tendenci ustálení kotvy ve výchozí pozici výrazně podporuje).

V případě, že by se v tento daný okamžik (48 ms) přerušilo napájení vinutí cívek  $U_2 = 0$  V, a byly by po další dobu průběhu ponechány bez napětí, kotva elektromagnetu by se dále, díky svojí dostatečně velké setrvačné síle, pohybovala stále stejným směrem až by nakonec kotva dosáhla druhé krajní polohy elektromagnetu. Tento zmíněný průběh, se všemi provozními funkcemi elektromagnetu, je vyobrazen v *Příloze č.2*.

Avšak v případě, který je vyobrazen v grafu závislosti na *Obr. 55*, bylo namísto přerušení napájení v čase 48 ms přivedeno opět napětí  $U_2 = 15$  V, tedy napětí s kladnou polaritou, což poté má za následek příznivý vliv pro polarizaci elektromagnetu. Konkrétněji dojde k dalšímu zmagnetování permanentních magnetů, avšak těch, které se nachází v druhé krajní poloze, jejichž vlivem se ještě více zrychlí odtah kotvy elektromagnetu. Jedná se tedy vlastně o pomocný napěťový impuls k zrychlení samotné polarizace elektromagnetu.

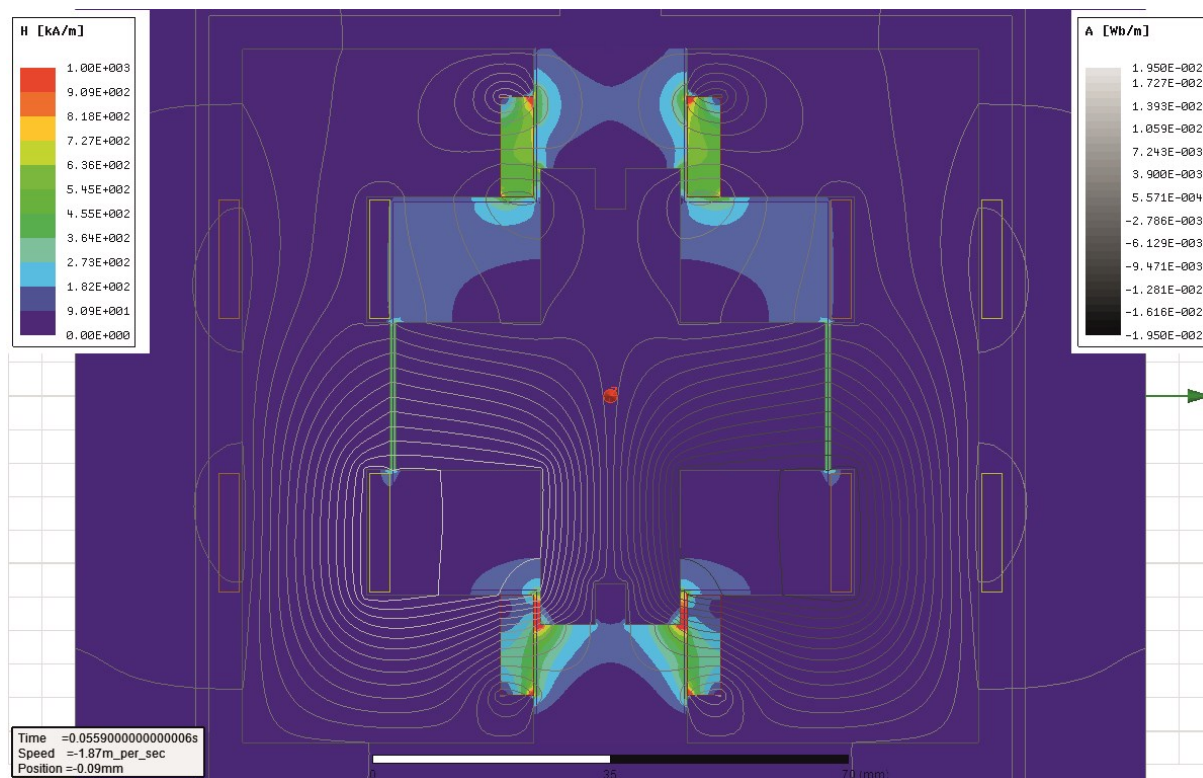
#### 6.4. Okamžik před koncem polarizace elektromagnetu

Podle grafu závislosti provedené simulace na *Obr. 55* se kotva elektromagnetu nachází v čase 55,9 ms v poloze odpovídající pozici přibližně 0 mm (vstupní napětí přivedené na vinutí je stále s kladnou polaritou  $U_2 = 15$  V).



*Obr. 62. Rozložení pole magnetické indukce B pro pozici kotvy 0 mm*

Jak je patrné z rozložení pole magnetické indukce na *Obr. 62*, nejvyšší hodnoty magnetické indukce  $B$  se vyskytují v krajních rozích tělesa kotvy v blízkosti permanentních magnetů, a to kolem  $B \approx 1,7 - 2$  T. Magnetická indukce v tělese kotvy, kde prochází společná cesta řídicího a polarizačního magnetického toku, dosahuje pro magnetický tok s vyšší hustotou siločar hodnot  $B \approx 1,2 - 1,3$  T, a s nižší hustotou siločar hodnot kolem  $B \approx 0,6$  T. V magnetickém obvodu, v místě zdroje syčení (vinutí bližší k druhé krajní poloze), dosahují hodnoty magnetické indukce  $B \approx 0,8 - 1$  T a u vinutí bližší k první krajní poloze dosahují opět přibližně polovičních hodnot syčení magnetického obvodu ( $B \approx 0,3 - 0,4$  T).



*Obr. 63. Rozložení pole magnetické intenzity  $H$  s magnetickým tokem pro pozici kotvy 0 mm*

Nejvyšších hodnot magnetické intenzity, podle rozložení pole na *Obr. 63*, nabývají vzduchové mezery mezi tělesem kotvy a v blízkosti permanentních magnetů v druhé krajní poloze. Konkrétněji magnetická intenzita v nich dosahuje hodnot blízkých se hranici  $H \approx 1 \text{ MA} \cdot \text{m}^{-1}$ . Magnetická intenzita ve vzduchových mezerách, v místech kde se uzavírá cesta magnetického toku mezi tělesem kotvy elektromagnetu a magnetickým obvodem, dosahuje hodnot  $H \approx 400 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Z porovnání cesty magnetického toku pro pozici kotvy 0 mm ve výchozí poloze (*Obr. 57*) a v čase 55,9 ms (*Obr. 63*) je vidět, jakým způsobem se podílí magnetický řídicí tok na polarizaci elektromagnetu a je zjevné, že polarizační magnetický tok (vycházející z permanentních magnetů v první krajní poloze), společně s částí řídicího magnetického toku, již začíná působit proti současnému pohybu kotvy. Velikost magnetické intenzity v prostoru, kde se uzavírá tato část magnetického toku (tedy v části prostoru „band“), dosahuje hodnot  $H \approx 100 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ .

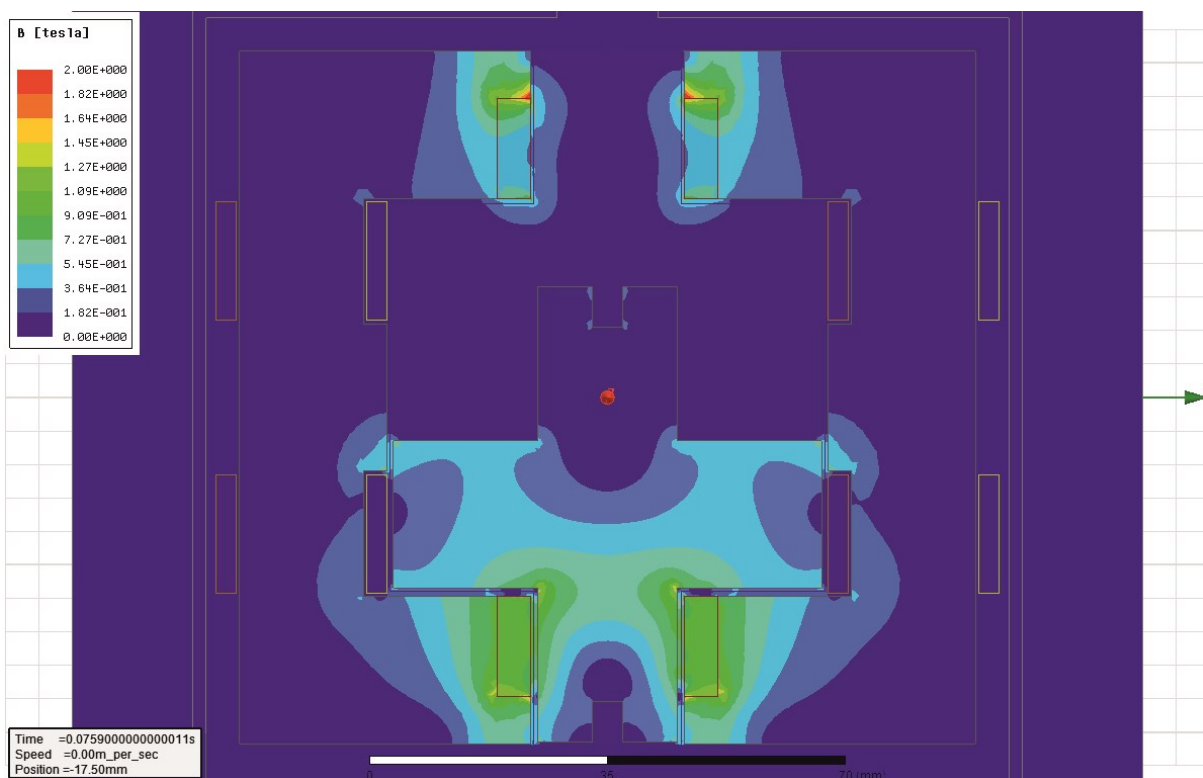
Ačkoliv se kotva nachází v čase 55,9 ms v pozici 0 mm, kotva elektromagnetu je v pohybu a má v sobě uloženou sílu v podobě vlastní setrvačnosti hmoty tělesa. Také na ni dále působí elektromagnetický moment způsobený vlivem působení permanentních magnetů v druhé krajní

poloze – dochází k silové interakci, která se projevuje značným zvýšením velikosti síly kladenou na kotvu elektromagnetu, působící pro její příznivý odtah (resp. pro její přitah do druhé krajní polohy). Velikost této síly v čase přibližně 55 ms dosahuje nejvyšší hodnoty  $F = 37,5$  N. Na kotvu elektromagnetu navíc působí stále elektromagnetický moment vytvořený řídicím vinutí, který napomáhá k zmíněnému příznivému odtahu kotvy, ale jen do určité doby.

Elektromagnetický moment, kladený na těleso kotvy elektromagnetu, se v dalším následujícím průběhu postupně zmenšuje právě až do okamžiku 60 ms, kdy začne působit opačným směrem než současný směr pohybu kotvy (působení jako brzda) – kotva poté opět nabývá tendence ustálení v původní výchozí poloze 0 mm. V čase 62 ms proto tedy dojde k ukončení doby působení řídicího impulsu o napětí  $U_2 = 15$  V. V případě, že by tato polarita napětí působila delší dobu, došlo by k výraznému zpomalení pohybu kotvy, které by dále mělo za následek pouze krátkodobý dotyk kotvy elektromagnetu s druhou krajní polohou a kotva by se začala pohybovat opačným směrem nazpět (měla by poté tendenci ustálit se ve výchozí poloze 0 mm).

### 6.5. Druhá krajní poloha kotvy

Dle grafu závislosti na Obr. 55 došlo v čase 62 ms k ukončení doby působení napěťového impulsu, po němž se kotva elektromagnetu pohybuje vlastní setrvačnou silou právě do druhé krajní koncové polohy. Na těleso kotvy stále působí elektromagnetický moment vyvolaný působením příslušných permanentních magnetů, které mají taktéž za následek rychlejší silový přitah kotvy do druhé krajní polohy.

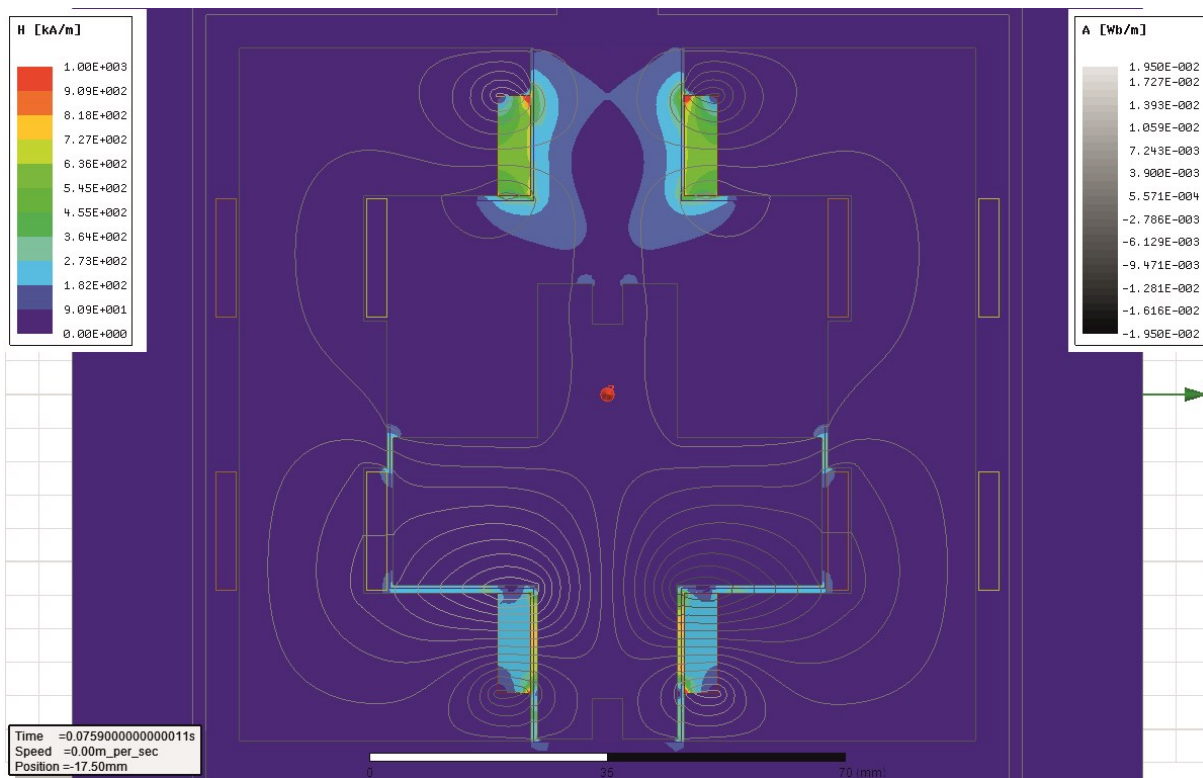


Obr. 64. Rozložení pole magnetické indukce  $B$  pro krajní pozici kotvy -17,5 mm

Rozložení pole magnetické indukce na Obr. 64 i rozložení pole magnetické intenzity na Obr. 65, pro krajní pozici kotvy -17,5 mm, odpovídá stejnému charakteru rozložení polí jako u první krajní polohy kotvy v protilehlé pozici 17,5 mm (Obr. 58, Obr. 59).



Magnetická indukce v tělesech permanentních magnetů přidržující kotvu elektromagnetu dosahuje hodnot  $B \approx 1$  T. V místech průchodu magnetického toku přes kotvu dosahuje magnetická indukce hodnot  $B \approx 0,6 - 1$  T v blízkosti permanentních magnetů a ve zbylé části tělesa kotvy hodnot  $B \approx 0,5$  T.



Obr. 65. Rozložení pole magnetické intenzity  $H$  s magnetickým tokem pro pozici kotvy -17,5 mm

Magnetická intenzita ve vzduchových mezerách, mezi ramena kotvy a blízkým magnetickým obvodem, přes které se uzavírá převážná část polarizačního magnetického toku, dosahuje hodnot kolem  $H \approx 200 - 300$  kA·m<sup>-1</sup>.

Magnetický tok na Obr. 65 je tvořen již jen polarizačním magnetickým tokem příslušných permanentních magnetů, které zajišťují stálý přitah kotvy v druhé krajní poloze. Magnetický tok se také opět uzavírá převážně přes ramena kotvy elektromagnetu, která setrvává ve druhé krajní poloze.

Celková doba polarizace elektromagnetu, tj. pohyb tělesa kotvy z první krajní polohy do druhé krajní polohy, trvala 30 ms (v grafu závislosti na Obr. 55 v čase 34 – 64 ms). Rychlost tělesa kotvy, krátce před dojezdem kotvy elektromagnetu do druhé krajní polohy, nabývá velikosti  $v = 2,2$  m·s<sup>-1</sup>.

V případě, že by provoz polarizovaného elektromagnetu byl řízen podle grafu závislosti provozních funkcí vyobrazeného v Příloze č.2, trvala by samotná polarizace elektromagnetu 42 ms s rychlostí tělesa kotvy před dojezdem do druhé krajní polohy  $v = 1$  m·s<sup>-1</sup>.

Další průběh grafu závislosti na Obr. 55 (v čase 74 – 120 ms) probíhá pro další polarizaci elektromagnetu pro opačný směr pohybu kotvy, tedy z druhé krajní polohy do první. Poměry rozložení magnetických polí a magnetického toku ve výpočtovém modelu, pro další polarizaci elektromagnetu, korespondují s již popsaným (opačným) průběhem polarizace.

## 7. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrzení vhodné konstrukce polarizovaného elektromagnetu, s jeho následnou analýzou provozních funkcí, určené pro pohon příslušného kontaktního systému. Bylo navrženo 9 různých konstrukčních typů, pro které byl na základě jejich původních provozních vlastností proveden výběr jednoho typu konstrukce pro další podrobnější analýzu. Předložený kontaktní systém byl podroben měření, jehož výsledkem byly potřebné parametry pro korektní návrh konstrukce elektromagnetu, konkrétně jeho rozměry a potřebné minimální silové působení táhla kotvy na kontaktní můstek.

Jednotlivé konstrukce elektromagnetů byly navrhovány na základě 3 teoreticky popsanych typů magnetických obvodů polarizovaných elektromagnetů, a to buď podle sériového, paralelního nebo můstkového. Následně pro všechny konstrukce byla provedena zjednodušená analýza provozních vlastností, podle nichž byl proveden výběr jedné vhodně odpovídající konstrukce z různých hledisek, a to na základě rozměrů, složitosti, rozdělení cest magnetických toků a silového působení na těleso kotvy.

Pro vybraný návrh konstrukce polarizovaného elektromagnetu (konstrukce 9) byla poté provedena podrobnější analýza za pomoci metody konečných prvků v programu „ANSYS Maxwell“, jehož výstupem byla výpočetní simulace zahrnující graf závislosti provozních funkcí elektromagnetu na čase a rozložení magnetického pole skrze zvolenou rovinu řezu výpočtového modelu.

Samotná polarizace elektromagnetu v provedené simulaci na *Obr. 55* v jednom směru, tj. z jedné krajní polohy do druhé, trvala 30 ms. Z provedené analýzy výsledků lze vyvodit, konkrétně z rozložení magnetického pole, že magnetický obvod polarizovaného elektromagnetu je schopen vyššího sycení. Z hlediska případné budoucí optimalizace by navýšení sycení magnetického obvodu mohlo vést buď k většímu proudovému zatížení vinutí obvodu (s ohledem na oteplení proudovodičů příslušných cívek procházejícím proudem), anebo ke snížení průřezu magnetického obvodu a tím i rozměru tělesa kotvy, potažmo celého elektromagnetu. V konečném důsledku by to znamenalo rozměrově menší, lehčí a levnější konstrukci, která by pravděpodobně umožnila ještě rychlejší polarizaci elektromagnetu.

Kotva elektromagnetu v jedné nebo druhé koncové poloze je pomocí permanentních magnetů, na základě provedené simulace, přidržována silou  $F = 14,3 \text{ N}$ , což splňuje potřebnou přitlačnou sílu na kontaktní můstek kontaktního systému. Těleso kotvy elektromagnetu tak, jak je vyobrazováno v této práci, je jen ryze hlavní funkční částí tvořené ocelí. Kotva by byla reálně dále opatřena kromě připevněného válcového táhla, které je součástí kontaktního můstku kontaktního systému, i o přídavek k tělesu kotvy zajišťující spolehlivé vedení pohybu kotvy, z důvodu zamezení případného mechanického styku hran kotvy s tělesem permanentního magnetu při polarizaci elektromagnetu. V případě, že by kotva byla bez zmíněného přídavku (pravděpodobně z mosazi nebo umělé hmoty), mohlo by dojít během provozu ke zmíněnému styku, což by mělo za následek odštípnutí části permanentního magnetu.

Dále, elektronické řízení elektromagnetu právě v požadovaném čase a intervalu trvání impulzu přivedeného na vstup vinutí, tj. podle grafu závislosti provedené simulace na *Obr. 55*, by se neobešlo bez sledování okamžité polohy tělesa kotvy za pomoci příslušného senzoru. Jednou z možností, jak docílit sledování pozice kotvy, resp. jakým způsobem vyhodnotit aktuální pozici kotvy během polarizace elektromagnetu v závislosti na změně magnetických veličin, je použití tzv. Hallovy sondy,

kteřá umožní indikaci změny velikosti magnetické indukce v určitém místě magnetického obvodu. Na základě patřičné změny magnetické indukce v konkrétním místě magnetického obvodu během přepolarizování elektromagnetu je možné vyhodnotit odpovídající pozici kotvy, při níž má dojít k požadovanému ukončení doby působení řídicího impulsu, či k opětovnému přivedení impulsu.

Alternativní (jednodušší) způsob elektronického řízení elektromagnetu, z hlediska přiváděných impulsů, je vyobrazen v *Příloze č.2*, kde samotná polarizace elektromagnetu je realizována jedním impulzem o příslušné polaritě napětí a délce doby trvání. Co se týče rychlosti samotné polarizace, pro tento jednodušší typ elektronického řízení, dosahuje doby trvání 42 ms.

Z hlediska estetiky a technologie výroby by bylo dále vhodné cívky, které jsou navinuty na magnetický obvod elektromagnetu, více zapustit do magnetického obvodu, aby jejich vinutí nepřesahovala okraje magnetického obvodu a tvořila tak celistvé těleso. Konstrukce by také mohla být částečně zpevněna za pomoci epoxidové pryskyřice.

## LITERATURA

- [1] BUL, B. K. – a kolektiv. *Elektrické přístroje: Základy teorie*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1977. L25-B3-V-31f/52220.
- [2] HAVELKA, O. – a kolektiv. *Elektrické přístroje*. 1.vyd. Praha: SNTL; Bratislava: Alfa, 1985. L25-C3-IV-3U/58603.
- [3] HAVELKA, O. *Stavba elektrických přístrojů I*. 1.vyd. Brno: VUT, 1984.
- [4] CIGÁNEK, L. *Elektrické přístroje spínací, ochranné a řídicí*. 3.vyd. Praha: SNTL, 1956. L25-C3-4-II.
- [5] MRAVEC, R. *Elektrické stroje a přístroje II*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1979. L26-C2-IV-31/55407.
- [6] KRÁL, J. – VANĚK, J. *Elektromagnetické přístroje*. 1.vyd. Brno: VUT, 1984.
- [7] DRÁPALA, J. – KURSA, M. *Elektrotechnické materiály*. 1.vyd. Ostrava: VŠB-TU, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [8] IVÁNEK, L. *Elektromagnetismus – učební text* [online]. 1.vyd. Ostrava: VŠB-TU, 2007. [cit. 2016-10-26]. Dostupné z: <<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/EMag/Elektromagnetismus.pdf>>. ISBN 978-80-248-1486-5.
- [9] ZAJÍC, J. *Fyzika II (Elektřina a magnetismus)*. 2.vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004. ISBN 80-7194-641-9.
- [10] DESORT, F. – KODADA, J. – FOIT, J. *Elektrotechnologie pro SPŠ elektrotechnické*. 2.vyd. Praha: SNTL, 1969. ISBN 04-515-69.
- [11] HASSDENTEUFEL, J. – DUBSKÝ, J. – RAPOŠ, M. – ŠANDERA, J. *Elektrotechnické materiály*. 2.vyd. Praha: SNTL; Bratislava: Alfa, 1978.
- [12] MALÝ, Z. – SIMERSKÝ, M. *Elektrotechnologie I*. 3.vyd. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-89004-47-4.
- [13] ZAJACZEK, S. *Návrh magnetického upínadla s trvalými magnety*. Ostrava, 2003. Diplomová práce na Fakultě elektrotechniky a informatiky VŠB-TU Ostrava. Vedoucí diplomové práce David Helštýn.
- [14] SVOREŇ, J. *Návrh vysokootáčkového asynchronního motoru*. Brno, 2012. Diplomová práce na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Vedoucí diplomové práce Ondřej Vítek.
- [15] *Silnoprúdová elektrotechnika* [online]. Učební text pro předmět silnoprúdové elektrotechniky bývalé katedry Elektrických strojů a přístrojů na Fakultě elektrotechniky a informatiky VŠB-TU Ostrava. [cit. 2014-10-29]. Dostupné z: <[http://feil.vsb.cz/kat410/www453/soubory/texty/ucebni\\_texty/se/SEL1a.pdf](http://feil.vsb.cz/kat410/www453/soubory/texty/ucebni_texty/se/SEL1a.pdf)>.
- [16] *Permanentní magnety - co je třeba vědět o magnetech* [online]. Sinomag s.r.o., výrobce permanentních magnetů a magnetických materiálů. [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <[http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni\\_magnety.pdf](http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf)>.

- [17] *Magnetické výrobky pre reklamu a elektrotechniku* [online]. Katalog firmy SELOS, s.r.o. 5.vyd. Trenčín: SELOS, 2009. [cit. 2016-12-12].  
Dostupné z: <<http://www.plasticportal.cz/image/firmy/338/pdf/2463.pdf>>.
- [18] *SELOS Bohemia, s.r.o.* [online]. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: <<http://www.magnety.eu>>.
- [19] *MAGSY, s.r.o.* [online]. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: <<http://www.magsy.cz>>.
- [20] *ANSYS, Inc.* [online]. Software určený pro inženýrské výpočetní simulace. [cit. 2016-12-12].  
Dostupné z: <<http://www.ansys.com/>>.
- [21] *ANSYS Maxwell 2D v15, User's Guide* [online]. Uživatelská příručka k softwaru ANSYS Maxwell. [cit. 2017-04-04].  
Dostupné z: <[http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell2D\\_V15.pdf](http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell2D_V15.pdf)>.
- [22] *ANSYS Maxwell v16, Training manual* [online]. Výuková příručka k softwaru ANSYS Maxwell. [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <<http://ansoft-maxwell.narod.ru/english.html>>.
- [23] *SolidVision, s.r.o.* [online]. Autorizovaný prodejce 3D CAD systému SolidWorks v České Republice. [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <<http://www.solidvision.cz/>>.
- [24] FUSEK, M. – HALAMA, R. *MKP a MHP* [online]. Text vytvořený v rámci realizace projektu „Matematika pro inženýry 21. století“, VŠB-TU Ostrava; ZČU v Plzni, 2011. [cit. 2017-04-04].  
Dostupné z: <[http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda\\_konecných\\_prvku\\_a\\_hranicních\\_prvku.pdf](http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecných_prvku_a_hranicních_prvku.pdf)>.
- [25] *Feromat Brno, s.r.o.* [online]. Distributor hutních a spojovacích materiálů. [cit. 2017-02-22].  
Dostupné z: <<http://www.feromat.cz/>>
- [26] *Arnold Magnetic Technologies Corp.* [online]. Katalog produktu NdFeB a referenční příručka globálního výrobce vysoce výkonných magnetů. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z:  
<<http://www.arnoldmagnetics.com/Portals/0/Files/Catalogs and Lit/Neo/151021/Catalog - 151021.pdf>>.
- [27] *Ningbo YiLi Magnetic Co., Ltd.* [online]. Výrobce a dodavatel magnetických materiálů, Čína. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: <<http://www.magnetmaterialyl.com>>.
- [28] *Hangzhou YangYi Magnetics Co., Ltd.* [online]. Dodavatel permanentních magnetů, Čína. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: <<http://www.smi-mag.com>>.
- [29] *Maanshan CY magnetic technology Co., Ltd.* [online]. Výzkum, vývoj, výroba a obchod s magnety, Čína. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: <<http://www.cymagnet.com>>.
- [30] *Wikimedia Commons* [online]. Organizované úložiště licenčně volného multimediálního obsahu. [cit. 2014-10-29]. Dostupné z: <<http://commons.wikimedia.org>>.

## SEZNAM PŘÍLOH

- |              |  |
|--------------|--|
| Příloha č. 1 | Graf závislosti provozních funkcí polarizovaného elektromagnetu na čase                          |
| Příloha č. 2 | Graf závislosti provozních funkcí polarizovaného elektromagnetu na čase se zjednodušeným řízením |